

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“CINÉTICA DEL SECADO CONVECTIVO DE  
HOJAS DE *Minthostachys mollis* (Muña)”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Bach. Carlos Ernesto Angeles Queirolo**

**Bach. Fabio Manuel Rangel Morales**

**Callao, 2019**

**PERÚ**

Two handwritten signatures are present on the right side of the page. The top signature is for Carlos Ernesto Angeles Queirolo, and the bottom signature is for Fabio Manuel Rangel Morales.

## **HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO**

### **MIEMBROS DEL JURADO**

<b>Dr. CARLOS ALEJANDRO ANCIETA DEXTRE</b>	<b>PRESIDENTE</b>
<b>Dr. OSCAR JUAN RODRÍGUEZ TARANCO</b>	<b>SECRETARIO</b>
<b>Mg. PABLO BELIZARIO DÍAZ BRAVO</b>	<b>MIEMBRO</b>
<b>Dr. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA</b>	<b>MIEMBRO</b>
<b>Dr. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS</b>	<b>ASESOR</b>

**Libro: N° 01    Folio N° 006                    Acta N° 004-2019-SPG-FIQ/UNAC**

**Fecha de Aprobación de tesis:    04 de Enero de 2019**

**Resolución de sustentación de  
Unidad de Posgrado:                    N° 104-2018-CD-UPG-FIQ-UNAC**

## ÍNDICE

	Página
TABLAS DE CONTENIDO	04
RESUMEN	08
ABSTRACT	09
I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.1 Identificación del problema	10
1.2 Formulación de problemas	13
1.3 Objetivos de la Investigación	14
1.4 Justificación	14
II MARCO TEÓRICO	16
2.1 Antecedentes del estudio	16
2.2 La muña ( <i>Minthostachys mollis</i> )	18
2.2.1 Características botánicas	19
2.2.2 Clasificación taxonómica	20
2.2.3 Composición química de las hojas de muña	21
2.2.4 Usos	22
2.3 Secado	23
2.3.1 Mecanismos de transferencia	24
2.3.2 Cinética del secado por convección	26
2.3.3 Factores en el secado por convección	31
2.3.4 Equipos de secado por convección	33
2.3.5 Modelado de la cinética del secado por convección	34
2.4 Destilación por arrastre con vapor	39

2.5	Definición de términos básicos	40
III	VARIABLES E HIPÓTESIS	42
3.1	Definición de las variables	42
3.2	Operacionalización de las variables	42
3.3	Hipótesis general y específica	43
IV	METODOLOGÍA	44
4.1	Tipo de investigación	44
4.2	Diseño de la investigación	44
4.3	Población y muestra	47
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	48
4.4.1	Recolección y acondicionamiento de la muña	48
4.4.2	Caracterización de muña fresca y seca	48
4.4.3	Prueba experimental de secado	53
4.5	Procedimientos de recolección de datos	54
4.5.1	Recolección y acondicionamiento de la muña	54
4.5.2	Análisis químicos de componentes mayores	56
4.5.3	Contenido de aceite esencial	58
4.5.4	Prueba experimental de secado	59
4.6	Procesamiento estadístico y análisis de datos	60
V	RESULTADOS	63
5.1	Caracterización de la muña	63
5.2	Contenido de aceite esencial	64
5.3	Curvas de secado	66
5.4	Modelado de las curvas de secado	74

VI	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
6.1	Contrastación de hipótesis con los resultados	81
6.1.1	Composición química de la muña	81
6.1.2	Contenido de aceite esencial	82
6.1.3	Curvas de secado	84
6.1.4	Modelado de las curvas de secado	88
6.2	Contrastación de resultados con otros estudios similares	100
6.2.1	Composición química de la muña fresca	100
6.2.2	Contenido de aceite esencial	102
6.2.3	Curvas de secado	103
6.2.4	Modelado de las curvas de secado	104
VII	CONCLUSIONES	108
VIII	RECOMENDACIONES	110
IX	REFERENCIALES BIBLIOGRÁFICAS	111
X	ANEXOS	121
10.1	Matriz de consistencia	122
10.2	Clasificación taxonómica de la muña	124
10.3	Datos experimentales de secado	126
10.4	Velocidad de secado: Período de velocidad constante	133
10.5	Velocidad de secado: Período de velocidad decreciente	137
10.6	Estimación de coeficientes de actividad	144
10.7	Energía de activación	157
10.8	Curvas de secado experimental y calculada	160

## **TABLAS DE CONTENIDO**

### **ÍNDICE DE CUADROS**

		Página
Cuadro 2.1	Clasificación taxonómica de la muña	21
Cuadro 2.2	Composición química de la muña	22
Cuadro 2.3	Equipos de secado por convección	34
Cuadro 2.4	Modelos de predicción del secado	38
Cuadro 3.1	Operacionalización de variables	42
Cuadro 4.1	Niveles de los factores	46
Cuadro 4.2	Valores de variables	46
Cuadro 4.3	Técnicas y normas para análisis químicos	49
Cuadro 5.1	Composición física de la muña	63
Cuadro 5.2	Composición química de la muña	64
Cuadro 5.3	Muña fresca – relación volumen/masa	65
Cuadro 5.4	Muña seca – relación volumen/masa	65
Cuadro 5.5	Contenido de humedad crítica	69
Cuadro 5.6	Velocidad de secado constante	70
Cuadro 5.7	Humedad de equilibrio	74
Cuadro 5.8	Coefficientes de difusividad	74
Cuadro 5.9	Energía de activación	75
Cuadro 5.10	Constantes de modelos a 1 m/s	76
Cuadro 5.11	Constantes de modelos a 2 m/s	77
Cuadro 5.12	Constantes de modelos a 40°C	78
Cuadro 5.13	Constantes de modelos a 50°C	79

Cuadro 5.14	Constantes de modelos a 60°C	80
Cuadro 6.1	Composición de la muña	82
Cuadro 6.2	Muña seca – Relación volumen/masa húmeda equivalente	83
Cuadro 6.3	Ecuaciones del modelo de Midilli	99
Cuadro 6.4	Modelo de Midilli – Correlación de constantes con la temperatura	100
Cuadro 6.5	Composición de muña - % Base seca	101
Cuadro 6.6	Contenido de aceite esencial en diversas hierbas aromáticas	102
Cuadro 6.7	Difusividad efectiva en diversas hierbas aromáticas	105
Cuadro 6.8	Energía de activación en diversas hierbas aromáticas	106
Cuadro 6.9	Modelos de predicción obtenidos en diversas hierbas aromáticas	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	Plantación de muña (Antareoc – Tarma)	19
Figura 2.2	Muña ( <i>Minthostachys mollis</i> )	20
Figura 2.3	Mecanismos de transferencia en el secado	24
Figura 2.4	Curva de secado	28
Figura 2.5	Curva de velocidad de secado	29
Figura 4.1	Diseño de la investigación	44
Figura 4.2	Zona de recolección de muña	47
Figura 4.3	Instrumentos para análisis químicos	50
Figura 4.4	Destilador por arrastre con vapor	51
Figura 4.5	Equipo de secado convectivo	53
Figura 4.6	Recolección de muña	54
Figura 4.7	Hojas de muña	56
Figura 4.8	Bandeja con hojas de muña	59
Figura 5.1	Curva de secado a 40°C y 1 m/s	66
Figura 5.2	Curva de secado a 50°C y 1m/s	67
Figura 5.3	Curva de secado a 60°C y 1 m/s	67
Figura 5.4	Curva de secado a 40°C y 2 m/s	68
Figura 5.5	Curva de secado a 50°C y 2 m/s	68
Figura 5.6	Curva de secado a 60°C y 2 m/s	69

Figura 5.7	Velocidad de secado decreciente a 40°C y 1 m/s	71
Figura 5.8	Velocidad de secado decreciente a 50°C y 1 m/s	71
Figura 5.9	Velocidad de secado decreciente a 60°C y 1 m/s	72
Figura 5.10	Velocidad de secado decreciente a 40°C y 2 m/s	72
Figura 5.11	Velocidad de secado decreciente a 50°C y 2 m/s	73
Figura 5.12	Velocidad de secado decreciente a 60°C y 2 m/s	73
Figura 6.1	Curvas de secado a 40°C, 50°C y 60°C	85
Figura 6.2	Curvas de secado a velocidades de 1 m/s y 2 m/s	86
Figura 6.3	Velocidad de secado constante	89
Figura 6.4	Curva de secado – Valor calculado a 40°C y 1 m/s	93
Figura 6.5	Curva de secado – Valor calculado a 40°C y 2 m/s	94
Figura 6.6	Curva de secado – Valor calculado a 50°C y 1 m/s	95
Figura 6.7	Curva de secado – Valor calculado a 50°C y 2 m/s	96
Figura 6.8	Curva de secado – Valor calculado a 60°C y 1 m/s	97
Figura 6.9	Curva de secado – Valor calculado a 60°C y 2 m/s	98

## RESUMEN

En esta tesis se ha determinado experimentalmente la cinética del secado convectivo de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) utilizando un secador de bandejas, a temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C, y velocidades del aire de 1 m/s y 2 m/s.

Las curvas de secado obtenidas muestran que el secado de las hojas abarca tres períodos: inducción, velocidad de secado constante y velocidad de secado decreciente; correspondiendo a este último el período más largo. Se ha encontrado que la velocidad de secado se incrementa a medida que aumenta la temperatura y la velocidad del aire.

La cinética del secado se ha modelado utilizando doce modelos y la evaluación de resultados ha determinado que el modelo de Midilli representa adecuadamente la variación del contenido de humedad con el tiempo de secado, para las condiciones de las pruebas experimentales.

Se ha determinado que la difusividad efectiva tiene valores de 2.41 E-09 a 2.93 E-09 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 1 m/s y de 2.75 E-09 a 3.38 E-09 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 2 m/s. La difusividad efectiva sigue el modelo de Arrhenius y, dentro del rango de 40°C - 60°C, la energía de activación fue de 14.70 kJ/mol para una velocidad del aire de 1 m/s y de 14.07 kJ/mol para una velocidad del aire de 2 m/s.

Palabras clave: *Minthostachys mollis*, cinética del secado convectivo, modelado

## ABSTRACT

In this thesis the kinetics of the convective drying of the leaves of *Minthostachys mollis* (muña) using a tray dryer, at temperatures of 40° C and 50° C and 60° C, and air speeds of 1 m/s and 2 m/s.

Drying curves obtained shows that drying of leaves covers three periods: induction, constant drying rate and decreasing drying rate, corresponding to this last a longer time. It was found that the drying rate increases as it increases the temperature and the air speed.

The kinetics of drying was modelled using twelve models and the evaluation of results has determined that Midilli model adequately represents the variation of moisture content with the drying time for the conditions of the experimental tests.

It has been determined that the effective diffusivity has values of 2.41 E-09 to 2.93 E-09 m<sup>2</sup>/s for an air speed of 1 m/s and 2.75 E-09 to 3.38E -09 m<sup>2</sup>/s for an air speed of 2 m/s. The effective diffusivity follows the Arrhenius model and, within the range of 40°C - 60°C, and the activation energy was 14.70 kJ/mol for an air speed of 1 m/s and 14.07 kJ/mol for an air speed of 2 m/s.

Key words: *Minthostachys mollis*, Convective drying kinetics, modeling

## I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 Identificación del problema

En el Perú se conoce desde tiempos antiguos la utilización de productos de origen vegetal, como alimentos, condimentos o en la medicina tradicional. Tal es el caso de la muña (*Minthostachys mollis*) que es utilizada como condimento (elaboración de sopas) y en forma empírica en los cuidados de la salud, en diversas formas tales como infusiones, decocciones o macerados, para el alivio de dolores estomacales y combatir los parásitos intestinales, e incluso para preservar los tubérculos almacenados dado las propiedades antiparasitarias de sus hojas. (Cabieses, 1993).

En cuanto a su composición química, estudios realizados muestran que presenta un alto contenido de calcio (Collazos, 1996) y que la bio-accesibilidad del calcio proveniente de la muña es mayor que el proveniente de la leche, cuando se utiliza muña deshidratada para la elaboración de infusiones (Liceras, 2017). En consecuencia, la muña deshidratada se puede utilizar como una fuente importante de calcio para el ser humano. Se conoce además que su aceite esencial es una fuente de terpenoides tales como pulegona, mentona, limoneno y mentol, que tienen propiedades bactericidas (Cano, 2014).

La disponibilidad de la muña, como muchos productos de origen vegetal, suele ser irregular, y por tanto fluctúa a lo largo del año. Dado que un producto vegetal, aún después de ser recolectado, es un ser vivo, este sufre alteraciones que pueden ser desfavorables a su calidad. Estas alteraciones o modificaciones pueden ocurrir durante el período de post - cosecha, durante el transporte desde las zonas de recolección hacia los lugares donde se consumen y durante el almacenamiento. En tal sentido, resulta conveniente aplicar algún método de conservación para preservar la calidad del producto. (Van Arsdel et al., 1973).

El secado es uno de los métodos de conservación de alimentos, que consiste en reducir el contenido de agua de los alimentos a niveles tales que permitan la conservación por un periodo más prolongado. El efecto conservador del secado constituye uno de los descubrimientos más antiguos de la humanidad y su eficacia se basa en el hecho de que los microorganismos no pueden crecer ni causar alteraciones en alimentos cuya actividad de agua se encuentre en niveles críticos.

Por otro lado, la separación del agua de los tejidos paraliza las reacciones de deterioro natural del producto, resultando un material de calidad duradera. El agua es el elemento más importante en la estabilidad de un alimento. Por ello, la eliminación del agua traerá

como consecuencia una serie de factores favorables para la conservación del producto. (Cheftel, 1977).

El secado convectivo se caracteriza por el uso de aire caliente para la eliminación de la humedad y presenta algunas ventajas, principalmente económicas, sobre los demás procesos de conservación, ya que pueden reducir los gastos de almacenamiento y de distribución de productos deshidratados, al reducirse tanto el peso como el volumen del producto (Van Arsdel et al., 1973).

El comportamiento que describe la pérdida de humedad de un sólido húmedo, cuando está en contacto directo y expuesto a la acción del aire caliente, se conoce como la cinética de secado, la cual relaciona la velocidad de pérdida de humedad en función del tiempo.

Este comportamiento, además de ser específico para el producto sometido a este tratamiento, también está influenciado por las denominadas variables externas que afectan el secado. Estas variables externas son la temperatura, la humedad y la velocidad a la cual fluye el aire caliente en el equipo de secado (Treybal, 2000).

El estudio de la cinética del secado es esencial para diseñar un correcto proceso de secado que permita además obtener un producto de calidad y por otro lado un modelo matemático del secado, puede

considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos tales como daños al producto, consumo excesivo de energía o la disminución del rendimiento durante el secado (Coulson y Richardson, 2013).

Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo consistió en realizar el estudio del secado por aire caliente de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*), que nos pueda conducir a la obtención de un modelo matemático que describa su cinética en función a la variación de las condiciones externas de secado tales como la temperatura y el flujo de aire caliente.

## **1.2 Formulación de problemas**

### **Problema general**

¿Cuál será el modelo que explica la cinética del secado observada durante el secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*)?

### **Problemas específicos**

a) ¿Cuál es el efecto de la temperatura del aire caliente sobre la cinética del secado observado durante el secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*)?

- b) ¿Cuál es el efecto de la velocidad del aire caliente sobre la cinética del secado observado durante el secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*)?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

En base a los problemas planteados, se han formulado los siguientes objetivos:

#### **Objetivo general**

Identificar el modelo que explica la cinética del secado observado durante el secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*).

#### **Objetivos específicos**

- a) Determinar el efecto de la temperatura del aire caliente en el secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*).
- b) Determinar el efecto de la velocidad del aire caliente en el secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*).

### **1.4 Justificación**

El desarrollo de este trabajo de investigación permitirá:

- ✓ Lograr una forma de aprovechamiento a escala industrial de la muña (*Minthostachys mollis*).
- ✓ Verificar si las teorías generales sobre el secado se cumplen en el caso de la muña (*Minthostachys mollis*).
- ✓ Obtener un modelo matemático que describa la cinética del secado de la muña (*Minthostachys mollis*) para su aplicación en el diseño de equipos de secado.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del estudio

Da Rocha et al. (2012) en su trabajo de investigación "CINÉTICA DEL SECADO DE TOMILLO" estudiaron la cinética del secado de tomillo con posterior ajuste de diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales para determinar valores de la difusividad efectiva y la energía de activación para temperaturas de 30 °C a 70 °C. Utilizaron el análisis de regresión no lineal, por el método Simplex-Quasi-Newton y los resultados mostraron que el modelo de Page obtuvo un mejor ajuste a los datos experimentales. Obtuvieron valores de difusividad efectiva entre  $3.69 \times 10^{-12}$  y  $1.19 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y un valor de energía de activación de 77.16 kJ/mol.

Montes et al (2008) en su trabajo de investigación "MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE ÑAME (dioscórea rotundata) EN CAPA DELGADA" evaluaron el secado de ñame cortado en rodajas finas de diversos espesores utilizando un secador de bandejas a temperaturas de 45, 55 y 70 °C y velocidad promedio de aire de 1 m/s. Con los resultados obtenidos fueron construidas las curvas de secado observándose que este proceso tuvo lugar en el período decreciente, evidenciando que la difusión era el mecanismo que controlaba el proceso de secado de ñame. Las curvas de secado se ajustaron

utilizando los modelos de Page, Thompson, Newton, Page modificado, Henderson-Pabis y el modelo logarítmico. Encontraron que el modelo logarítmico era el que describía mejor el proceso de secado del ñame.

Correa et al. (2007) en su trabajo de investigación "MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) EM CAMADAS DELGADAS" obtuvieron y evaluaron las curvas de secado del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y lo ajustaron a diferentes modelos matemáticos. Los frijoles cosechados con un contenido de agua de 0.92 (base seca) fueron sometidos a un secado hasta un contenido de 0.14 (base seca). Los datos experimentales se ajustaron con 12 modelos matemáticos para representar el proceso. Se encontró que seis de estos modelos representaban adecuadamente el secado del frijol. Sin embargo, el modelo de Page fue seleccionado por su simplicidad y su amplia utilización por los investigadores que describen la cinética del secado de productos agrícolas.

Vega, A; Tello, C. y Lemus, R. (2006) en su trabajo de investigación "SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SECADO DE LA GRACILARIA CHILENA (*GRACILARIA CHILENSIS*)" estudiaron y modelaron la cinética de secado del alga Gracilaria utilizando un

secador convectivo utilizando aire a temperaturas entre 30' y 70 °C y a velocidad de  $2.0 \pm 0.2$  m/s. Para el modelado matemático utilizaron las ecuaciones empíricas de Newton, Henderson-Pabis y Page. Durante el secado se observó solo el período de velocidad decreciente, por lo que se utilizó la segunda ley de Fick para calcular la difusividad efectiva del agua. Se obtuvieron humedades finales de 9,6 % y 6.1 % en base seca para las temperaturas de 30 °C y 70 °C respectivamente. Tanto la difusividad como los parámetros cinéticos de los modelos utilizados presentaron dependencia con la temperatura. De los modelos utilizados, el modelo de Page mostró la mejor calidad de ajuste sobre los datos experimentales.

## **2.2 La muña (*Minthostachys mollis*)**

La muña, especie vegetal del género *Minthostachys* y de la familia de las lamiláceas. Es una especie de planta arbustiva leñosa, oriunda de Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, encontrándose también en regiones altas y áridas. El clima más apropiado para su crecimiento es aquel con abundantes lluvias y elevada luminosidad (Alkire *et al.*, 1994 y Schmidt-Lebuhn, 2007, citado por Yapuchura 2010).

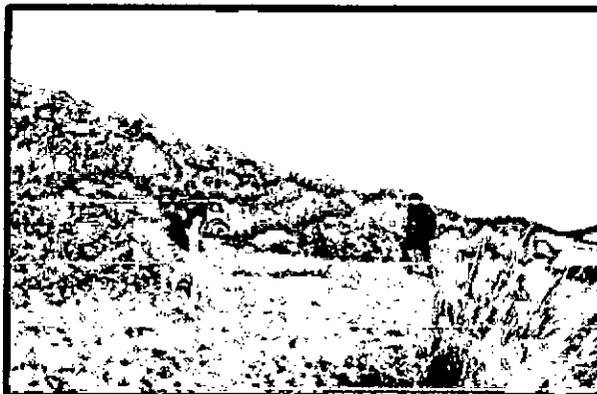
La muña es una planta aromática que llega a tener una altura de 80 cm a 120 cm, es frondosa en la parte superior, erecta y pubescente.

Su tallo es ramificado desde la base y posee hojas pequeñas, aserradas. Sus flores son blancas y se encuentran reunidas en cortos racimos. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2009).

En el Perú, se le encuentra en diversos pisos altitudinales de la región andina, de 2,500 a 3,500 msnm. Se afirma que se conocen 8 especies de *Minthostachys* que crecen en el Perú y que, de éstas, la *Minthostachys mollis* se puede encontrar en los departamentos de Amazonas, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Huancavelica, Junín, Lima, La Libertad y Piura. (Brako y Zarucchi, 1993; citado por Yapuchura, 2010).

**Figura 2.1**

**PLANTACIÓN DE MUÑA (Antareoc – Tarma)**



**2.2.1 Características botánicas**

La muña es una planta frondosa en la parte superior de aspecto bien tupido en hojas, las mismas que son opuestas y aserradas,

presentando pelos en los pecíolos y en la cara inferior de las hojas, en los cuales se depositan la mayor cantidad de aceite esencial. (Figura 2.2).

**Figura 2.2**

**MUÑA (*Minthostachys mollis*)**



El tallo es ramificado desde la base que también presenta pelos, tiene forma cuadrangular y son propensos a la lignificación, las flores son pequeñas y blancas, irregulares o zigomorfas; se encuentran reunidas en pseudo verticilos axilares, formando cuatro pequeñas cimas, brevemente pedunculadas, dos en cada axila y situadas en la parte superior de las ramas (Cano, 2007; citado por Yapuchura, 2010).

### **2.2.2 Clasificación taxonómica**

La clasificación taxonómica es el ordenamiento en grupos y en orden jerárquico, que se aplica para la identificación de un ser

vivo. Para conocer la clasificación taxonómica de la muña se llevó una muestra vegetal al Herbario San Marcos del Museo de Historia Natural, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, para su estudio y clasificación, utilizándose el Sistema de clasificación de Cronquist. (Anexo 2). Los resultados se presentan en el cuadro 2.1.

**Cuadro 2.1**

**CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LA MUÑA**

<b>DIVISIÓN</b>	<b>MAGNOLIOPHYTA</b>
<b>CLASE</b>	<b>MAGNOLIOPSIDA</b>
<b>SUBCLASE</b>	<b>ASTERIDAE</b>
<b>ORDEN</b>	<b>LAMIALES</b>
<b>FAMILIA</b>	<b>LAMIACIAE</b>
<b>GÉNERO</b>	<i>Minthostachys</i>
<b>ESPECIE</b>	<i>Mintosthachys mollis</i>
<b>Variedad</b>	<i>mollis Griseb</i>

Fuente: Museo de Historia Natural - UNMSM

**2.2.3 Composición química de la muña**

La composición química se determina mediante procedimientos analíticos y hace referencia a compuestos como el agua, proteínas, grasas, carbohidratos y cenizas como componentes

mayores; y a los minerales y vitaminas como componentes menores.

La información obtenida sobre la composición química de la muña, de interés para el presente trabajo se presenta en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUÑA**

100 g de muestra

	Muña seca <sub>1</sub>	Muña fresca <sub>2</sub>	Muña seca <sub>2</sub>
<b>COMPONENTES MAYORES</b>			
Agua, g	16.0	76.18	6.78
Proteínas, g	3.2	2.78	12.77
Grasa total, g	2.8	0.59	2.80
Carbohidratos, g	66.3	18.74	69.80
Fibra cruda, g	9.4	7.03	17.5
Genizas, g	11.7	1.71	7.85
<b>MINERALES</b>			
Calcio, mg	2237.0	220.0	1370.0
Fósforo, mg	269.0	----	----
Hierro, mg	22,40	----	----

Fuente: (1) Instituto Nacional de Salud, 2009  
(2) Liceras, 2017

**2.2.4 Usos**

Hojas, tallos y flores son las partes de la muña que se utilizan en preparaciones como tisanas (infusiones o decocciones), que se elaboran haciendo hervir agua con hojas u otras partes de la

planta, y que brinda diferentes beneficios para la salud. (Schmidt-Lebuhn, 2008; citado por Liceras, 2017).

En la actualidad a la muña se le reconocen propiedades medicinales y en la cultura andina se la utiliza como infusión por sus propiedades carminativas para la curación de afecciones intestinales, como la indigestión o diarreas de tipo bacteriano, así como en casos de acidez estomacal. La infusión de hojas y flores es un remedio importante para combatir parásitos internos y externos. Las hojas de muña también se emplean en la curación de fracturas, luxaciones y tumores ocasionados por golpes. (Instituto Nacional de Salud, 2011).

En la Sierra del Perú es empleada también como condimento, por ejemplo, en la elaboración de la “sopa verde”, además de ser el método más antiguo de conservación de los tubérculos almacenados, como la papa, dado las propiedades antiparasitarias de sus hojas. (Cabieses, 1993).

### **2.3 Secado**

El secado, como una operación unitaria en la ingeniería química se caracteriza por la eliminación, generalmente parcial, de la humedad de sólidos, mediante la vaporización de ésta, ya sea en el seno de una corriente gaseosa o no, para arrastrar el vapor producido. La

separación o eliminación se realiza por medio del calor. (Treybal, 2000).

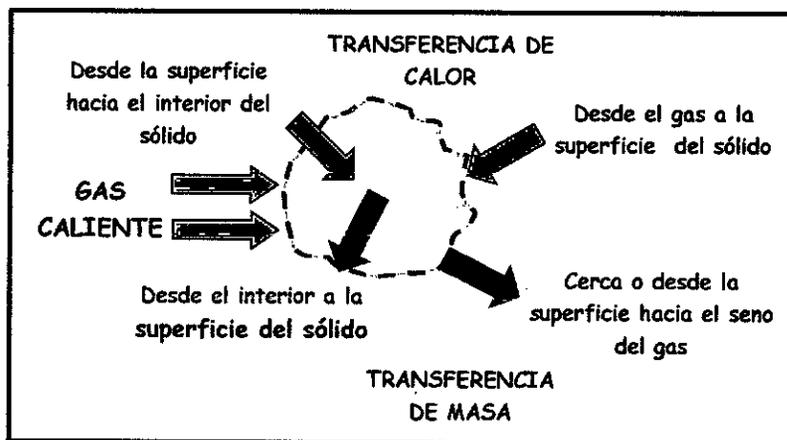
El término humedad se usa de manera genérica e incluye a todo líquido volátil contenido en un sólido mediante enlaces de tipo físicos y físico-químicos que es eliminado en la operación de secado. Generalmente la humedad presente en los sólidos es el agua, mientras que el gas que proporciona la energía necesaria para la vaporización y que arrastra el vapor formado es el aire.

### 2.3.1 Mecanismos de transferencia

Cuando se seca un sólido se producen dos mecanismos de transferencia fundamentales y de modo simultáneo (Figura 2.3).

Figura 2.3

#### MECANISMOS DE TRANSFERENCIA EN EL SECADO



Estos mecanismos son:

- ✓ Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- ✓ Transferencia de masa de la humedad interna y del líquido evaporado.

Estos fenómenos ocurren tanto en la parte interna como externa del sólido. En la parte interna tienen lugar la transferencia de calor desde la superficie hacia el interior del sólido y la transferencia de masa desde el interior del sólido hacia su superficie; mientras que en la parte externa ocurre la transferencia de calor desde el seno del gas hacia la superficie del sólido y la transferencia de masa de la humedad vaporizada en la superficie del sólido hacia el seno del gas.

El mecanismo del secado, al ser controlado por la transferencia de calor y por la transferencia de materia, consiste en el transporte de materia desde el interior del sólido a su superficie, la vaporización del líquido en o cerca de la superficie, y el transporte del vapor hacia el seno del gas. Simultáneamente se transfiere calor desde el seno del gas hacia la fase sólida, en donde todo o parte de éste da lugar a la vaporización y el remanente se acumula como calor sensible (Angeles, 2016).

La característica principal en la operación de secado es que los fenómenos de transporte en la fase gas ocurren en condiciones estacionarias, mientras que en la fase sólida ocurren en condiciones no estacionarias.

### **2.3.2 Cinética del secado por convección**

El secado por aire caliente es un método por el cual se transfiere calor al sólido húmedo fundamentalmente por convección, al entrar en contacto directo con el sólido húmedo; siendo uno de los métodos más utilizados.

La cinética del secado de un sólido húmedo se refiere a la velocidad a la cual este sólido pierde su humedad, siguiendo un patrón determinado. El comportamiento de un sólido respecto al secado es función de la naturaleza del sólido, de la naturaleza de la humedad, de la temperatura y de las condiciones del gas (temperatura y humedad relativa). (Coulson, 2013).

Cuando se quiere diseñar un secador por convección es necesario conocer el mecanismo y la cinética del secado de un material en cuestión, es decir se deben establecer relaciones cuantitativas entre el tiempo que debe durar la operación y las condiciones de secado, antes de efectuar cualquier intento de

cálculo. Para lograr establecer una relación cuantitativa entre el tiempo de secado y cada una de las variables, se deberán efectuar pruebas experimentales manteniendo constantes cada una de ellas; exceptuando la que queremos analizar. (Angeles, 2016).

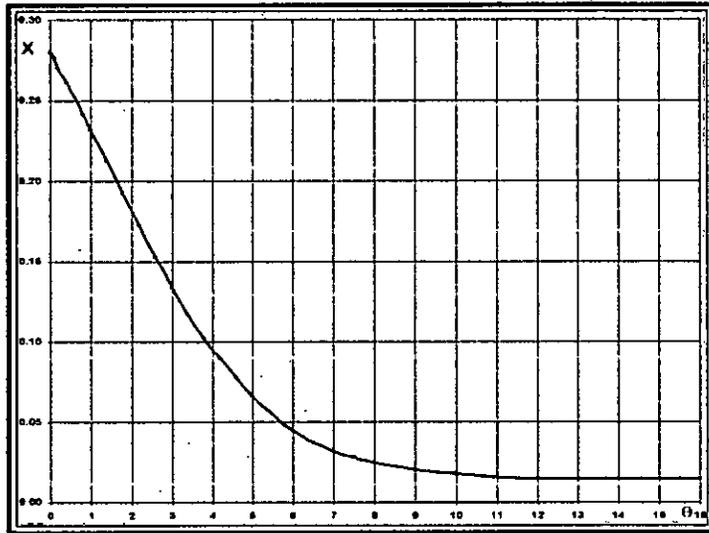
Una prueba experimental del secado consiste en determinar periódicamente el contenido de humedad de una muestra del sólido, utilizando intervalos de tiempo variables, medidos desde el inicio de la prueba, pero manteniendo constantes todas las variables que influyen el tiempo de secado. Esta medición se realiza tomando el peso del sólido en función del tiempo que transcurre la operación.

Las características del secado de un sólido se describen muy bien cuando se representa el contenido de humedad del sólido (expresando la humedad en base seca ( $X$ ) frente al tiempo transcurrido ( $\theta$ ) desde que se inició la operación (Treybal, 2000).

Esta representación gráfica da origen a lo que se conoce como la Curva de secado, que se presenta en la Figura 2.4.

Figura 2.4

CURVA DE SECADO



El comportamiento del secado se puede observar mejor, si a partir de la curva de secado se calcula la velocidad de secado (N) y se representa frente al contenido de humedad del sólido, dando origen a la curva de velocidad de secado.

La velocidad de secado (N) se define como la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo y por unidad de área de la superficie del sólido expuesta al secado, operando en condiciones constantes (Treybal, 2000).

Esta velocidad se puede evaluar mediante la siguiente expresión:

$$N = - \frac{L_S}{A} \cdot \frac{dX}{d\theta} \quad (1)$$

donde:

$L_s$  = Peso del sólido seco

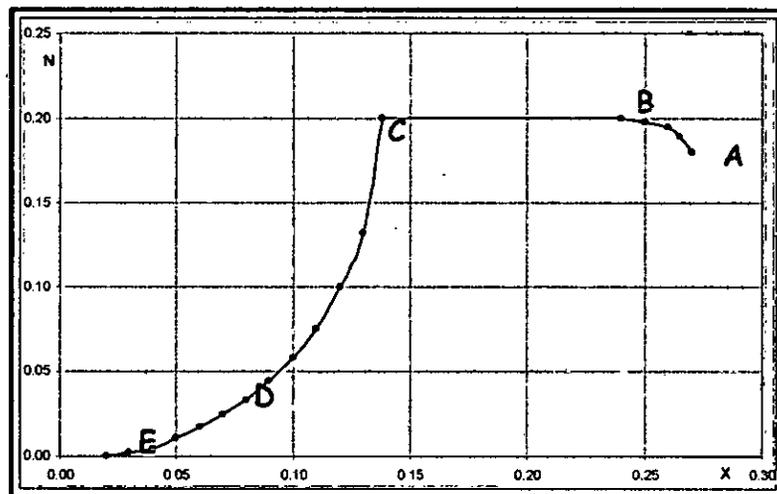
$A$  = Superficie del sólido expuesta al secado

$(dX/d\theta)$  = Variación del contenido de humedad con  
respecto al tiempo.

En la curva de velocidad de secado se pueden distinguir en forma más clara que en la curva de secado, las zonas o períodos que ocurren cuando un sólido es expuesto al secado, tal como se muestra en la figura 2.5.

Figura 2.5

### CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO



Se pueden distinguir las siguientes zonas:

- ✓ Zona A-B: **Período de inducción**, donde la pérdida de humedad del sólido aumenta ligeramente; el sólido húmedo se calienta y aumenta la temperatura de la interfaz,

produciéndose una adaptación del sólido a las condiciones de secado. Generalmente este período es corto, por lo que para fines de cálculo se prescinde de él, ya que se considera que en su transcurso el secado tiende al régimen estacionario (Geankoplis, 1998).

- ✓ **Zona B-C: Período de velocidad de secado constante,** donde la pérdida de humedad del sólido varía linealmente con el tiempo de secado.

En este período la velocidad con que se elimina la humedad de la superficie del sólido es menor que la velocidad con que esta llega a la superficie desde el interior del mismo. A esto se debe que la superficie del sólido se mantiene constantemente mojada y se comporta como una masa de líquido, de ahí que la velocidad de secado es igual a la velocidad de evaporación de la humedad. En tales condiciones, la temperatura de la interfaz será constante y el calor que llega al sólido se invierte totalmente en evaporar el líquido (Geankoplis, 1998).

- ✓ **Zona C-E: Período de velocidad de secado decreciente,** en donde la pérdida de humedad del sólido comienza a disminuir; anulándose cuando la humedad del sólido alcanza

su valor de equilibrio con el gas de secado. En este momento comienza el período de velocidad decreciente en que parte del calor que llega a la superficie del sólido, se invierte en calentarlo. En este punto, el contenido de humedad del sólido se conoce como la humedad crítica ( $X_c$ ). La película superficial de humedad se reduce y un secado posterior ocasiona la aparición de zonas secas sobre la superficie, las que ocuparán progresivamente mayores proporciones a medida que continúa el secado (Geankoplis, 1998).

### **2.3.3 Factores en el secado por convección**

Las variables que influyen en las curvas de secado son numerosas y están relacionadas tanto con las condiciones de la fase gaseosa como con el sólido que está siendo expuesto al secado.

- ✓ **Para la fase gaseosa se deben considerar la temperatura, velocidad, humedad, dirección del flujo y las propiedades de transporte del gas.**

Si en el equipo de secado se pueden considerar despreciables los efectos de la transferencia de calor por conducción y radiación, la velocidad de secado es proporcional a la velocidad del gas, es decir a medida que

aumenta lo hace también la velocidad de secado. Sin embargo, a partir de ciertos valores el efecto es menos importante, ya que el secado está controlado por los mecanismos de difusión de la humedad. Si los efectos de la conducción y radiación son importantes, el efecto del flujo del gas será menor.

La velocidad de secado también es proporcional a la temperatura del gas. Al aumentar la temperatura del gas se incrementa la diferencia con la temperatura de la superficie de secado, por lo que la velocidad de secado se incrementa.

La velocidad de secado también es inversamente proporcional a la humedad del gas. Al aumentar la humedad, disminuye el gradiente de humedades en el seno de la corriente gaseosa, se transfiere a ésta menor cantidad de humedad y la velocidad de secado disminuye (Treybal, 2000).

- ✓ **Para la fase sólida** se debe considerar la naturaleza, el estado de agregación, la geometría, tamaño, espesor y las propiedades de transporte de la fase sólida.

La composición y estructura del material influyen en la actividad del agua en lo que se refiere a la humedad de equilibrio.

Si las superficies que no se están secando están bien aisladas ó si el secado ocurre en todas las superficies del sólido, la velocidad de secado es independiente del espesor. Durante el período de velocidad de secado constante, el tiempo de secado es directamente proporcional al espesor. (Treybal, 2000).

#### **2.3.4 Equipos de secado por convección**

Los equipos de secado por convección se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el material húmedo, al que principalmente transfieren calor por convección, y que arrastran fuera del secador los vapores producidos.

Estos secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizando los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen una manipulación

especial. En el cuadro 2.3 se presentan los principales equipos de secado por convección.

**Cuadro 2.3**

**EQUIPOS DE SECADO POR CONVECCIÓN**

<b>INTERMITENTES</b>	<b>CONTINUOS</b>
<b>Secador de horno</b> <b>Secador de bandejas</b>	<b>Secador de túnel</b> <b>Secador de cascada</b> <b>Secador rotatorio</b> <b>Secador lecho fluidizado</b> <b>Secador neumático</b> <b>Secador por atomización</b>

**2.3.5 Modelado de la cinética del secado por convección**

Para el diseño de un secador se requieren datos sobre el mecanismo y cinética del secado, que pueden representarse en forma de gráficos o expresarse mediante ecuaciones.

En el desarrollo y perfeccionamiento de los equipos utilizados para el secado es muy importante la simulación y obtención de información teórica referida al comportamiento de cada producto durante la eliminación de la humedad que contiene un sólido.

La representación gráfica de los datos experimentales de una prueba de secado da como resultado las curvas de secado, las cuales se pueden utilizar para obtener modelos matemáticos

que ayuden a predecir el comportamiento o cinética del secado de un sólido. (Treybal, 2000).

Los modelos matemáticos son herramientas útiles para estimar el tiempo necesario en reducir la cantidad de agua del producto a diferentes condiciones de secado mejorando la eficiencia del proceso y se pueden utilizar modelos teóricos, semi-empíricos y empíricos. Los modelos teóricos solo toman en consideración la resistencia interna a la transferencia de calor y agua entre el producto y el aire caliente (difusividad efectiva). Los modelos semi-empíricos y empíricos derivan una relación directa entre el contenido medio de agua y el tiempo de secado. A pesar de que no dan una visión clara y precisa de los procesos que ocurren durante el secado, estos pueden describir la curva de secado para las condiciones en las que fue realizado el estudio (Panchariya et al., 2002).

La mayoría de estos modelos derivan del modelo difusional de la segunda ley de Fick para diferentes geometrías. El modelo difusional de Fick considera que la transferencia del agua desde el interior del sólido hacia la superficie del mismo tiene lugar principalmente por difusión, calculándose de este modo un coeficiente de difusión efectivo. (Crank, 2004).

La segunda ley de Fick para una placa plana (lámina delgada), para un medio isotrópico y con un coeficiente de difusión eficaz constante, es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = D_W \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Si además se considera que la difusión ocurre en una sola dirección (x), la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = D_W \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

Se puede obtener la solución a esta ecuación, expresando la concentración como humedad en base seca (X = masa agua/masa sólido seco), bajo las consideraciones siguientes:

- ✓ La distribución de las concentraciones al inicio es uniforme,
- ✓ El encogimiento de la muestra se puede considerar despreciable y.
- ✓ El coeficiente de difusión efectivo a una temperatura es constante.

La solución a esta ecuación viene dada por:

$$\frac{X^* - X}{X^* - X_0} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \text{EXP} \frac{-D_W \cdot (2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \theta}{4 L^2} \quad (4)$$

Considerado solo el primer término de la sumatoria, es decir para n = 0, la ecuación se convierte en:

$$\frac{X^* - X}{X^* - X_0} = \frac{8}{\pi^2} \text{EXP} \frac{-D_w \cdot \pi^2 \cdot \theta}{4 L^2} \quad (5)$$

donde:  $X^*$  es la humedad de equilibrio expresada en base seca,  $X$  es la humedad en cualquier instante expresada en base seca,  $X_0$  es la humedad inicial expresada en base seca,  $D_w$  es la difusividad eficaz del agua,  $\theta$  es el tiempo y  $L$  es el semi-espesor de la lámina. Esta última ecuación se puede utilizar para evaluar la difusividad eficaz  $D_w$  (Crank, 2004).

Si denominamos  $RH = (X^* - X)/(X^* - X_0)$ , como una razón de humedades:

$$RH = \frac{X^* - X}{X^* - X_0} = \frac{8}{\pi^2} \text{EXP} \frac{-D_w \cdot \pi^2 \cdot \theta}{4 L^2} \quad (6)$$

Los modelos no se pueden aplicar de modo universal, son válidos dentro de ciertos rangos y tampoco se puede indicar si son aplicables a un caso particular, por lo que se requiere un tratamiento de datos experimentales para determinar el modelo adecuado.

Estos modelos para la predicción del fenómeno de secado se basan en las condiciones de equilibrio entre el sólido húmedo y la atmósfera a la que está expuesta el sólido.

Existe una amplia variedad de modelos que se pueden utilizar para la predicción de los fenómenos de transferencia de masa en el secado de productos de origen vegetal. (Rojas, 2007).

En el cuadro 2.4 se presentan algunos modelos que son utilizados comúnmente para la predicción del secado de productos de origen vegetal.

**Cuadro 2.4**

**MODELOS DE PREDICCIÓN DEL SECADO**

Ecuación	Modelo
$RH = e^{-k \cdot \theta}$	Newton
$RH = e^{-k \cdot \theta^n}$	Page
$RH = (e^{-k \cdot \theta})^n$	Page modificado I
$RH = e^{-(k \cdot \theta)^n}$	Page modificado II
$RH = a \cdot e^{-k \cdot \theta}$	Henderson - Pabis
$RH = a \cdot e^{-k \cdot \theta} + b \cdot e^{-k_0 \cdot \theta} + c \cdot e^{-k_1 \cdot \theta}$	Henderson - Pabis modificado
$RH = a \cdot e^{-k \cdot \theta^n} + b \cdot \theta$	Midilli
$RH = a \cdot e^{-k_1 \cdot \theta} + b \cdot e^{-k_2 \cdot \theta}$	Dos términos
$RH = a \cdot e^{-k \cdot \theta} + (1 - a) \cdot e^{-a \cdot k \cdot \theta}$	Exponencial de dos términos
$RH = e^{-a \cdot (a^2 + 4 \cdot b \cdot \theta)^{0.5} / 2 \cdot b}$	Thompson et al.
$RH = 1 + a \cdot \theta + b \cdot \theta^2$	Wang & Singh
$RH = a \cdot e^{-k \cdot \theta} + (1 - a) \cdot e^{-b \cdot k \cdot \theta}$	Aproximación a Difusión

Fuente : Corrêa, 2007; Lee, 2016 y Agbossou, 2016.

donde:

$\theta$  = tiempo (min)

$k, k_0$  y  $k_1$  = constantes de secado ( $\text{min}^{-1}$ )

$a, b, c$  y  $n$  = coeficientes de los modelos (adimensional)

## 2.4 Destilación por arrastre con vapor

La destilación por arrastre con vapor se utiliza para separar sustancias orgánicas que son ligeramente volátiles pero insolubles en el agua, de otros compuestos orgánicos que no son arrastradas por el vapor o de otras sustancias no volátiles.

Este es un método de destilación que consiste en la inyección de vapor de agua saturado o sobrecalentado, que es generado en un caldero provisto de un sistema de adición de calor. Sobre el caldero, ubica una rejilla que contenga al material vegetal, aislándolo del agua líquida pero que permite el paso del vapor de agua generado. De esta manera, al entrar el vapor de agua en contacto con el material vegetal se volatilizan los compuestos orgánicos volátiles. La mezcla vaporizada se lleva a un condensador para provocar un cambio de fase y el líquido resultante se lleva a un decantador de modo que el compuesto orgánico inmisible con el agua se separa por diferencia de densidades. (Stashenko, 2009).

La destilación por arrastre con vapor es utilizada para separar los aceites esenciales de tejidos vegetales tales como hojas, tallos, cáscaras o semillas de algunas plantas. Los aceites esenciales pueden estar almacenados en glándulas, conductos, sacos, o simplemente reservorios dentro del vegetal, por lo que muchas veces es recomendable una reducción de tamaño adecuado para proveer

una mayor área de contacto con el vapor y por consiguiente un mayor rendimiento de separación.

En este método se opera a temperaturas cercanas a los 100 °C, y se utiliza a escala industrial debido a que la tecnología requerida no es muy sofisticada y a que se obtiene un producto de alta pureza y un alto rendimiento. (Stashenko, 2009).

## 2.5 Definiciones de términos básicos

✓ **Cinética del secado:** Patrón que sigue la velocidad de secado (N) en función del tiempo, se define como la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo y por unidad de área de la superficie del sólido expuesta al secado, operando en condiciones constantes.

✓ **Contenido de humedad, en base húmeda (x):** Es la humedad que contiene un sólido, expresada como la relación entre la masa de la humedad y la del sólido húmedo.

$$x = \text{masa de humedad} / \text{masa de sólido seco.}$$

✓ **Contenido de humedad, en base seca (X):** Es la humedad que contiene un sólido, expresada como la relación entre la masa de la humedad y la del sólido seco.

$$X = \text{masa de humedad} / \text{masa de sólido seco.}$$

- ✓ **Humedad de equilibrio ( $X^*$ ):** Es el límite al cual puede llevarse el contenido de humedad de un sólido, cuando éste se pone en contacto con un gas por un tiempo suficiente y en condiciones determinadas.

Quando un sólido húmedo se pone en contacto con una corriente de un gas a temperatura y humedad determinadas y constantes, utilizándose un gran exceso del gas para que sus condiciones permanezcan invariables y después de haber expuesto el sólido por un tiempo suficiente, éste podrá perder o ganar humedad hasta alcanzar un contenido de humedad definido.

- ✓ **Humedad libre:** Se define como la cantidad de humedad que puede perder un sólido después de un contacto suficientemente prolongado con un gas a condiciones constantes de humedad relativa y temperatura. La humedad libre está dada por la diferencia entre el contenido de humedad del sólido y el contenido de humedad de equilibrio. Depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del gas, de la temperatura y de la naturaleza del sólido.

### III. VARIABLES E HIPÓTESIS

#### 3.1 Definición de las variables

Las variables identificadas fueron del tipo cuantitativo:

X = Velocidad de secado de las hojas de muña

X<sub>1</sub> = Temperatura del aire caliente

X<sub>2</sub> = Velocidad del aire son independientes.

$X = f(X_1, X_2)$

#### 3.2 Operacionalización de variables

La operacionalización de variables se presenta en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1

#### OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODO
X = Velocidad de secado	• Variación de contenido de humedad	• Peso sólido húmedo	• Método gravimétrico
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODO
X <sub>1</sub> = Temperatura del aire caliente	• Rango de temperaturas	• °C	• Observación experimental
X <sub>2</sub> = Velocidad del aire	• Rango de velocidades	• m/s	• Observación experimental

### **3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas**

#### **3.3.1 Hipótesis general**

Si las hojas de muña (*Minthostachys mollis*) son sometidas a un secado convectivo en condiciones constantes, a diferentes temperaturas y velocidades de flujo de trabajo, la cinética del secado seguirá un comportamiento que corresponde a un modelo determinado.

#### **3.3.2 Hipótesis específicas**

- ✓ El incremento de la temperatura produce un aumento de la velocidad del secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*).
  
- ✓ El incremento del flujo de aire en la cámara de secado produce un aumento de la velocidad del secado convectivo de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*).

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1 Tipo de investigación

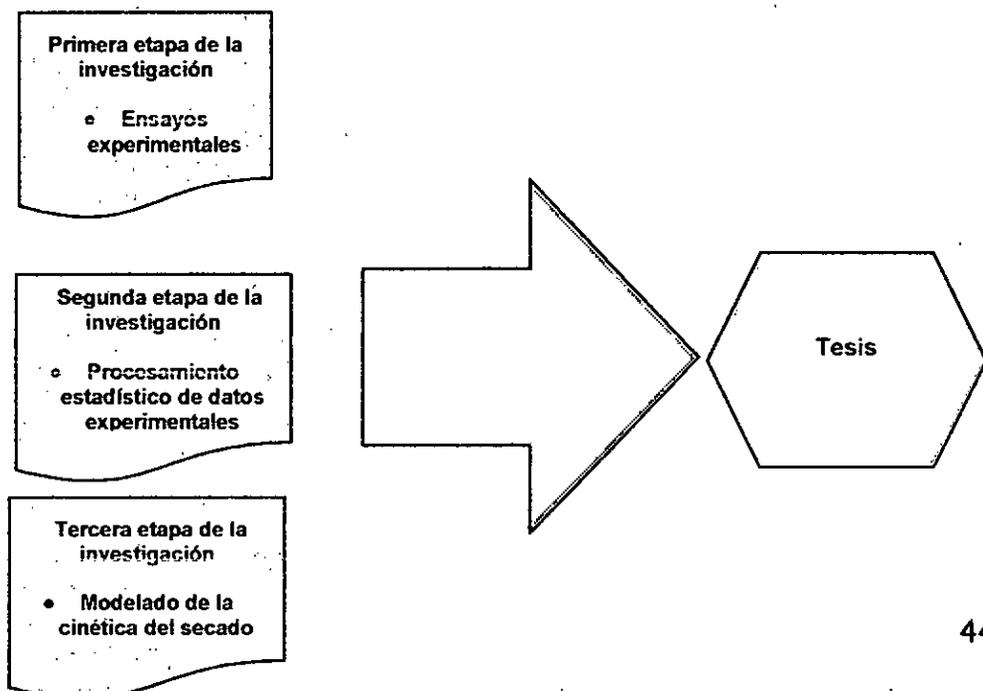
El presente trabajo de investigación por su finalidad es de tipo aplicada, ya que sus resultados tienen una aplicación práctica y por su diseño interpretativo es de tipo experimental. En cuanto a la naturaleza de los datos manejados, las variables de la investigación son cuantitativas.

### 4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación ha considerado cuatro etapas, las cuales podemos notar en la figura 4.1.

Figura 4.1

#### DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN



**Primera etapa de la investigación:**

En la primera etapa de la investigación, en base a la revisión de la teoría vinculada a las variables de investigación, se realizaron pruebas de laboratorio para obtener la información que nos permitió conocer datos experimentales vinculados a la variable  $X_1$ , la temperatura y a la variable  $X_2$ , la velocidad de flujo del aire.

**Segunda etapa de la investigación:**

Con la información obtenida en la etapa anterior, se procedió a realizar un análisis de la información obtenida y el tratamiento de los resultados referidos al comportamiento del secado convectivo de las hojas de muña se realizaron de forma gráfica y mediante la aplicación de procedimientos estadísticos.

**Tercera etapa de investigación:**

En la tercera etapa de la investigación con la teoría y la información obtenida se procedió al modelado de la cinética del secado convectivo de las hojas de muña.

Para el estudio de la cinética del secado mediante experimentos a escala de planta piloto se tomó en consideración las variables independientes, que en este caso son variables cuantitativas. Se consideraron 2 factores, el primero fue la temperatura con tres niveles

y el segundo fue la velocidad de flujo de aire con dos niveles, tal como se muestra en el cuadro 4.1.

**Cuadro 4.1**

**NÍVELES DE LOS FACTORES**

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Temperatura	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Velocidad de flujo	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	-----

El experimento factorial resultante necesitó de  $3 \times 2 = 6$  condiciones experimentales, donde cada condición fue una prueba experimental de secado; cada una de estas con tres réplicas.

Los niveles de temperatura utilizados fueron 40 °C, 50 °C y 60 °C y los niveles de velocidad de flujo del aire fueron 1 m/s y 2 m/s, tal como se muestra en el cuadro 4.2.

**Cuadro 4.2**

**VALORES DE VARIABLES**

N° experiencia	Variables		Vector respuesta
	Temperatura, °C	Velocidad del aire, m/s	Velocidad de secado
1	40	1	N <sub>1</sub>
2	40	2	N <sub>2</sub>
3	50	1	N <sub>3</sub>
4	50	2	N <sub>4</sub>
5	60	1	N <sub>5</sub>
6	60	2	N <sub>6</sub>

### 4.3 Población y muestra

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se recolectaron muestras de plantaciones de muña, ubicadas en el Anexo Antareoc (3520 msnm) del distrito La Unión, Provincia de Tarma, departamento de Junín.

**Figura 4.2**

#### **ZONA DE RECOLECCIÓN DE MUÑA**



**Fuente: Google maps**

Dado que el presente trabajo de investigación es experimental no es aplicable la determinación del tamaño de muestra mediante los métodos estadísticos conocidos.

La cantidad de muestra utilizada está limitada por la capacidad de los equipos utilizados en las pruebas experimentales y que en el caso del presente trabajo la capacidad de las bandejas ha permitido utilizar

muestras de aproximadamente 60 gramos, que tenían un contenido de humedad inicial del 80 % peso.

#### **4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

Para contrastar y demostrar las hipótesis de trabajo, se aplicaron técnicas de investigación descriptiva y métrica.

Se aplicó una técnica descriptiva para la recolección y acondicionamiento de la materia prima. En cambio, se aplicaron técnicas métricas para evaluar el rendimiento, para la caracterización química de las hojas de muña, en estado fresco y como producto seco, para la evaluación del contenido de aceite esencial en la muña fresca y seca, así como para el estudio de la cinética del secado.

##### **4.4.1 Recolección y acondicionamiento de la muña**

Se utilizó una técnica descriptiva en lo que concierne a la recolección y acondicionamiento de la materia prima, previamente a las pruebas de secado.

##### **4.4.2 Caracterización de muña fresca y seca**

En el desarrollo del presente trabajo se realizó un estudio de los componentes químicos mayores de las hojas de muña, en

estado fresco y al producto seco; en el laboratorio de Química de Alimentos de la Universidad Nacional del Callao.

Los análisis químicos para obtener la composición química referida a los componentes mayores son la determinación de proteínas, grasas, cenizas y humedad. El contenido de carbohidratos se obtuvo por diferencia, restando del 100 % los porcentajes de proteínas, grasas, cenizas y humedad. Las técnicas y normas utilizadas en los análisis químicos se presentan en el cuadro 4.3.

**Cuadro 4.3**

**TÉCNICAS Y NORMAS PARA ANÁLISIS QUÍMICOS**

<b>ANÁLISIS</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>NORMA</b>
<b>Proteínas</b>	<b>Semi-micro Kjeldahl</b>	<b>A.O.A.C. 954.01</b>
<b>Grasas</b>	<b>Extracción sólido-líquido Soxhlet</b>	<b>A.O.A.C. 932.02</b>
<b>Cenizas</b>	<b>Calcinación</b>	<b>A.O.A.C. 942.05</b>
<b>Humedad</b>	<b>Secado en estufa</b>	<b>A.O.A.C 7.003</b>

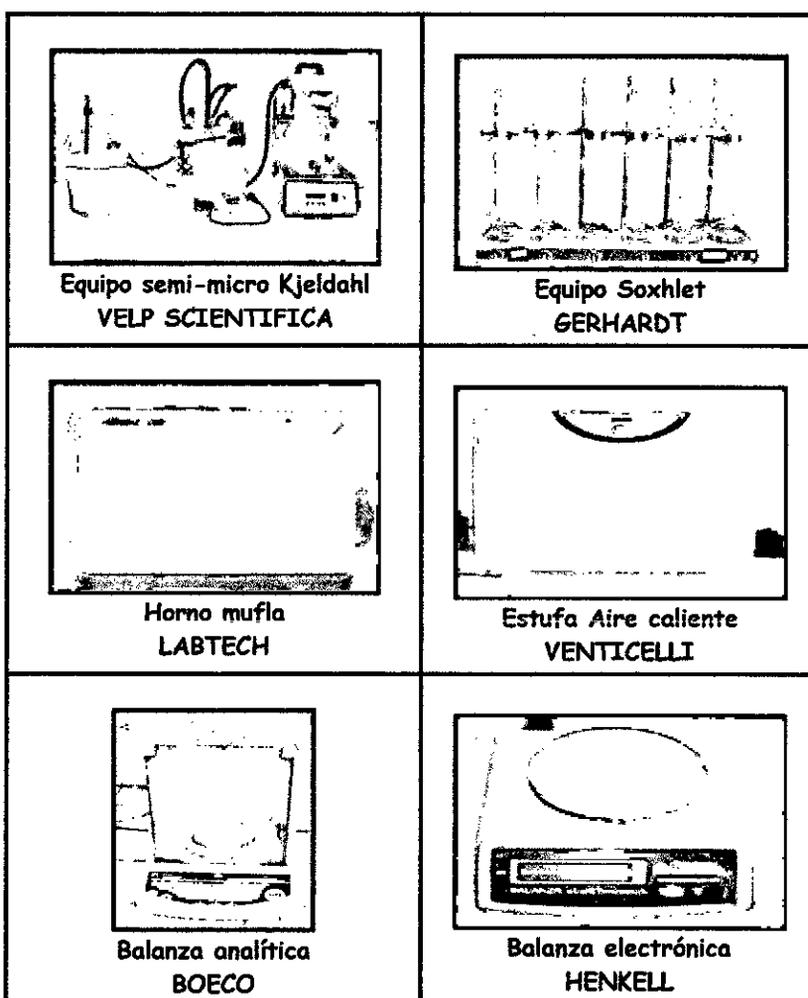
Los instrumentos utilizados para el análisis químico de los componentes mayores, que se muestran en la figura 4.3, fueron los siguientes:

- ✓ Equipo para análisis semi micro Kjeldahl VELP SCIENTIFICA

- ✓ Extractor tipo Soxhlet GERHARDT
- ✓ Horno mufla hasta 600 °C LABTECH
- ✓ Estufa de aire caliente VENTICELLI
- ✓ Balanza analítica Boeco 0.001 g
- ✓ Balanza electrónica Henkell 0.01 g

**Figura 4.3**

**INSTRUMENTOS PARA ANÁLISIS QUÍMICOS**

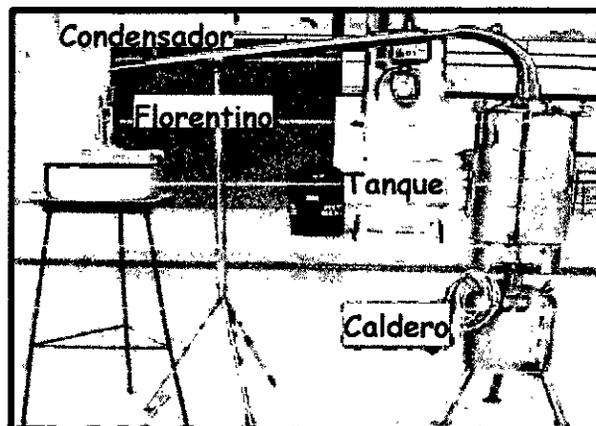


También se ha utilizado reactivos químicos especificados en las normas AOAC así como diversos materiales de vidrio y porcelana y otros, para análisis químicos.

Así mismo se aplicó como técnica la destilación para evaluar el contenido de aceites esenciales de las hojas de muña, en estado fresco y del producto seco, utilizando como instrumento un destilador por arrastre con vapor disponible en el laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Universidad Nacional del Callao (Figura 4.4).

**Figura 4.4**

**DESTILADOR POR ARRASTRE CON VAPOR**



El equipo consta de un caldero, un tanque receptor de materia prima, un condensador, todos de acero inoxidable y de un florentino.

El caldero es un tanque de base cóncava, con una capacidad de 10 litros de agua y que cuenta con una resistencia interna para generar vapor de agua.

El tanque receptor de materia prima, de 20 cm de diámetro y una altura de 48 cm, tiene una base con perforaciones sobre el cual se coloca la materia prima y que permite el paso del vapor de agua, y un conducto de salida del vapor que está conectado al condensador. Tiene una capacidad para colocar la materia prima hasta una altura de 50 cm.

El condensador es de doble tubo, con conexiones para la entrada y salida de agua, la cual circula por el ánulo y que es el medio utilizado para enfriar el vapor que circula por el tubo interior.

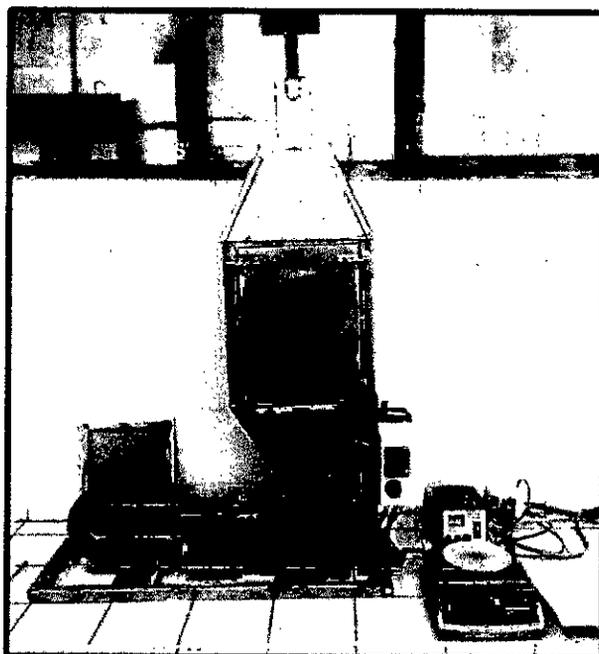
A la salida del condensador está colocado un florentino donde se recibe el agua y aceite que condensan. Debido a la diferencia de densidades, el aceite esencial se ubica en la parte superior y el agua en la parte inferior, que va siendo eliminada parcialmente a través de un conducto lateral a medida que se va depositando en el fondo.

#### 4.4.3 Prueba experimental de secado

Para las pruebas experimentales del secado de las hojas de muña se utilizó un secador experimental de bandejas por aire caliente que se muestra en la figura 4.5.

Figura 4.5

#### EQUIPO DE SECADO CONVECTIVO



El equipo consta de un soplador, de una resistencia para calentar el aire, una cámara de secado donde se coloca la bandeja con la materia prima, un regulador de temperatura y un regulador de flujo de aire. Para controlar la temperatura se utilizó un termómetro digital y para controlar el flujo de aire se utilizó un anemómetro.

## 4.5 Procedimiento de recolección de datos

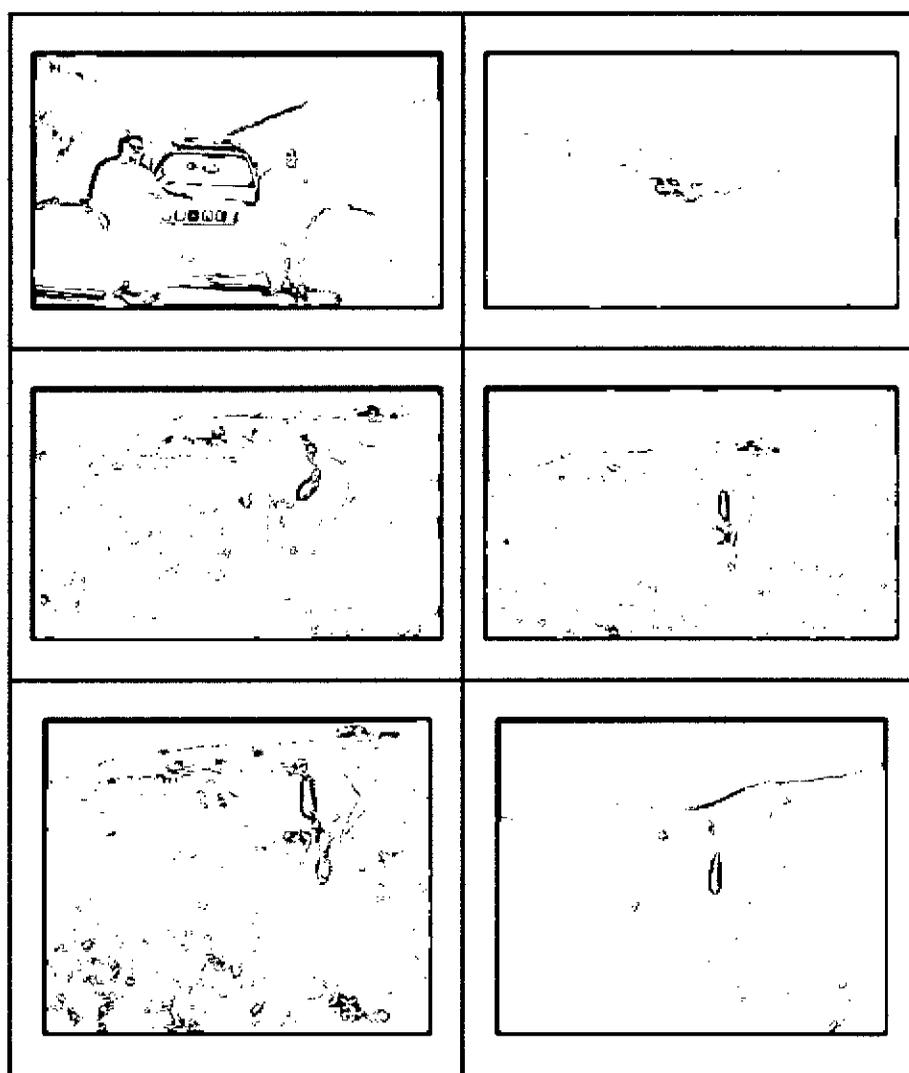
### 4.5.1 Recolección y acondicionamiento de la muña

#### Recolección

Las plantas de muña se recolectaron cuidando de seleccionar aquellas que estaban frescas, que no presentaran ramas quebradas y hojas con manchas o con signos de marchitez.

Figura 4.6

#### RECOLECCIÓN DE MUÑA



Las plantas recolectadas se colocaron en bolsas de papel para evitar el contacto con la luz solar y se guardaron en una caja conservadora.

Luego se transportaron a los ambientes donde se realizaron los diferentes ensayos, y se guardaron a una temperatura de 10 °C para evitar pérdidas de humedad.

### **Acondicionamiento de la materia prima**

Se acondicionó la materia prima realizando una selección, lavado y escurrido.

#### **Selección**

Se realizó la selección de la muña tomando en cuenta la frescura de las hojas de la planta, separando aquellas que estaban marchitas y aquellas que presentaban manchas o defectos causados por mohos, ya que estos factores influyen en la calidad del producto terminado.

#### **Limpieza o lavado**

La limpieza se realizó por inmersión en agua clorada (3 - 5 ppm de hipoclorito de sodio) con la finalidad de separar toda partícula extraña a la materia prima y una desinfección de las hojas, eliminando los restos de suciedad que podría favorecer el crecimiento de microorganismos y deteriorar el producto.

Luego se enjuagó con agua limpia, para eliminar las últimas trazas de suciedad y el olor característico del desinfectante.

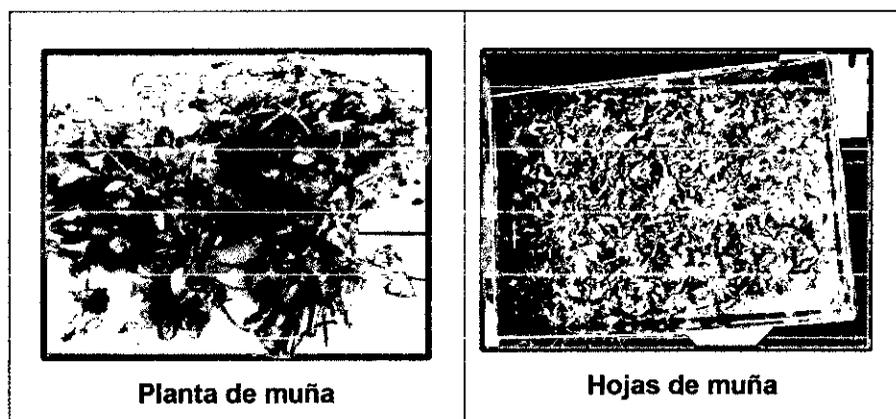
### **Ecurrido**

Finalmente, se escurrieron tratando de separar el agua que estaba en la superficie de las plantas y se utilizó papel absorbente para eliminar restos de agua.

Luego las hojas se separaron manualmente de los tallos en la cantidad requerida para cada ensayo. Para evaluar el rendimiento se pesó la planta y las hojas separadas de la misma, antes de pasar a las pruebas de secado.

**Figura 4.7**

### **HOJAS DE MUÑA**



#### **4.5.2 Análisis químico de componentes mayores**

Para el análisis químico de los componentes mayores de las hojas de muña, en cada caso se realizaron los ensayos por

triplicado. Los procedimientos utilizados para cada análisis se especifican a continuación:

- ✓ **Proteínas:** Se pesó aproximadamente 2 g de hojas de muña y se realizó un ataque con ácido sulfúrico al 98 %, agregando sulfato de cobre y sulfato de potasio como catalizadores, transformando el nitrógeno orgánico en iones amonio y se destiló en medio fuertemente básico, que se recibe en ácido bórico. Luego se tituló con ácido clorhídrico para calcular la cantidad de nitrógeno presente. Multiplicando este valor por el factor 6.25, se estimó el contenido de proteínas.
  
- ✓ **Grasas:** Se pesó 3 – 5 g de hojas de muña seca y se colocó en un cartucho de papel de filtro. Este se introdujo en la cámara central de un equipo Soxhlet y se sometió a extracción a reflujo colocando en el balón previamente pesado, 70 ml de éter de petróleo como solvente. Se eliminó el solvente y se colocó en una estufa a 90°C para evaporar los restos de solvente. Finalmente se pesó el balón conteniendo el residuo.
  
- ✓ **Cenizas:** Se pesó alrededor de 2 g de muña en un crisol de porcelana y se colocaron en un horno (mufla) a 550 °C y por

un tiempo de 4 horas o el necesario para obtener cenizas libres de carbón. Se transfirió el crisol a un desecador para su enfriamiento y luego se pesó.

- ✓ **Humedad:** Se pesó 2 – 5 g de hojas de muña en un crisol de porcelana y se colocó en una estufa a 105 - 110 °C y por 5 horas. Se llevó a un desecador para enfriar la muestra y se pesó. Se colocó nuevamente en la estufa por 30 minutos, se enfrió en el desecador y se pesó nuevamente. Se repitió el procedimiento hasta peso constante.
  
- ✓ **Carbohidratos:** El contenido de carbohidratos se obtendrá por diferencia, restando del 100 % los porcentajes de proteínas, grasas, cenizas y humedad.

#### **4.5.3 Contenido de aceite esencial**

Para la obtención del aceite esencial, se colocó agua en el caldero y se cargaron muestras de las hojas de muña en cantidades aproximadamente de 1.0 kg para las hojas frescas y de 0.5 kg para las hojas secas.

Se procedió a abrir la toma de agua en el condensador y luego se encendió el caldero, que estuvo en funcionamiento por un tiempo de 90 minutos.

El vapor volatiliza los aceites esenciales y lo arrastra llevándolo hacia el condensador, donde se licúa y a la salida se recibe en el florentino.

Finalizada la destilación, el líquido retenido en el florentino se pasó a un embudo de separación, para obtener el aceite y se le agregó sulfato de sodio anhidro para eliminar restos de agua, se filtró y luego se midió el volumen obtenido con ayuda de una pipeta graduada. La muestra se guardó en frascos de vidrio de color ámbar.

#### **4.5.4 Prueba experimental de secado**

Las pruebas de secado se realizaron utilizando un equipo experimental de secado de bandejas utilizando aire caliente.

En la figura 4.8 se observa la muestra de hojas colocadas en la bandeja.

**Figura 4.8**

#### **BANDEJA CON HOJAS DE MUÑA**



Las hojas de muña se colocaron en una bandeja construida con una malla tipo rejilla y de dimensiones 20 cm x 14.5 cm x 1 cm, en capas de 1.0 cm de espesor. Se procuró colocarlas de modo uniforme, para asegurar que el secado ocurra también de manera uniforme.

La prueba experimental de secado consistió en pesar periódicamente las hojas de muña utilizando intervalos de tiempo definidos, controlando que la temperatura y flujo del aire permaneciera constante.

La prueba finalizó cuando el peso de la muestra tendió a ser constante, es decir hasta que la variación de peso de las hojas fue casi nula.

#### **4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos**

Con los datos obtenidos experimentalmente se realizó un análisis utilizando en primer lugar los elementos de la estadística descriptiva, en lo referente a la caracterización de la materia prima y al contenido de aceite esencial de las hojas de muña fresca y seca. Se utilizó el programa estadístico Minitab 17 para el cálculo de las medidas de tendencia central (media aritmética) o de dispersión (desviación estándar).

También se utilizó el análisis de regresión para poder construir el modelo matemático que represente la cinética del secado y que explique los datos obtenidos durante el secado de las hojas de muña, correlacionando las variables humedad y tiempo, a la temperatura y velocidad del aire de cada ensayo. Se aplicó el programa matemático para ecuaciones no lineales Polymath 6.10 Professional Release, el cual nos permitió la evaluación de la calidad de los modelos de regresión.

Para seleccionar el modelo más adecuado se empleó la hoja de cálculo Excel 10.0 para calcular criterios estadísticos tales como los coeficientes de determinación  $R^2$  y  $R^2_{adj}$  que frecuentemente se utilizan para juzgar si el modelo representa correctamente los datos, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RH_{exp,i} - RH_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RH_{exp,i} - \overline{RH_{cal,i}})^2} \quad (7)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2) \cdot (N - 1)}{(N - p)} \quad (8)$$

En estas ecuaciones:

$N$  = Número de observaciones

$p$  = Número de parámetros del modelo

$RH_{exp,i}$  = Razón de humedad experimental

$RH_{cal,i}$  = Razón de humedad calculada

Si su valor es cercano a la unidad implica que el modelo es correcto, sin embargo, esto debe ser corroborado con el análisis de residuales, debido a que hay muchos ejemplos en el que este coeficiente de correlación es cercano a uno, pero el modelo no es apropiado. (Kucuk et al., 2014).

Para una mejor decisión, estos resultados se corroboraron con el análisis de residuales tales como error cuadrático medio (MSE - Mean Squared Error) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE - Root Mean Squared Error), mediante las siguientes ecuaciones:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (RH_{exp,i} - RH_{cal,i})^2}{N} \quad (9)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (RH_{exp,i} - RH_{cal,i})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (10)$$

En estas ecuaciones:

N = Número de observaciones

$RH_{exp,i}$  = Razón de humedad experimental

$RH_{cal,i}$  = Razón de humedad calculada

Al igual que los coeficientes de determinación, es recomendable estos análisis de los residuales para la comparación de los diversos modelos que representan la misma variable dependiente. Se espera que sus valores sean cercanos a cero, un modelo con menor MSE y RMSE representa los datos con mayor precisión que un modelo con valores más grandes de estos indicadores (Kucuk et al., 2014)

## V RESULTADOS

### 5.1 Caracterización de la muña

La materia prima utilizada fue la muña (*Minthostachys mollis*), dado que solo se utilizaron las hojas se realizó una evaluación del porcentaje de hojas que contenía la planta.

Se tomaron seis plantas de la muestra recolectada, se pesaron y a cada una ellas se les separaron las hojas, las cuales también fueron pesadas. Los resultados se muestran en el cuadro 5.1, arrojando un valor promedio de 45.98 % con una desviación estándar de 0.34.

Cuadro 5.1

#### COMPOSICIÓN FÍSICA DE LA MUÑA

Nº Muestra	Peso de planta, g	Peso de hojas, g	% peso hojas
1	480.0	220.0	45.83
2	500.0	230.0	46.00
3	495.0	230.6	46.59
4	470.0	214.1	45.55
5	520.0	239.2	46.00
6	498.0	228.7	45.92
		Promedio	45.98

En cuanto a la composición química proximal de las hojas tanto frescas como secas, las pruebas permitieron determinar la cantidad de componentes mayores tales como agua, proteínas, grasas, carbohidratos y cenizas. En el cuadro 5.2 se presentan los resultados promedio de los análisis químicos.

**Cuadro 5.2**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUÑA**  
**(Por 100 g de parte comestible)**

<b>Componente</b>	<b>Muña fresca</b>	<b>Muña seca</b>
<b>Humedad</b>	<b>80.00</b>	<b>10.00</b>
<b>Proteínas</b>	<b>2.35</b>	<b>10.60</b>
<b>Grasas</b>	<b>0.51</b>	<b>1.70</b>
<b>Cenizas</b>	<b>1.45</b>	<b>6.40</b>
<b>Carbohidratos</b>	<b>15.69</b>	<b>71.30</b>
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

## **5.2 Contenido de aceite esencial**

Con la finalidad de evaluar el efecto del secado sobre el contenido de aceite esencial de las hojas de muña, se procedió a separar el aceite esencial mediante una destilación con arrastre de vapor. Se realizaron seis ensayos con hojas de muña fresca y seis ensayos con hojas de muña seca.

En ambos casos se evaluó el rendimiento de separación del aceite midiendo el volumen de aceite obtenido y se calculó la relación volumen de aceite/masa de muestra, expresándola en porcentajes. (cuadros 5.3 y 5.4). Se obtuvo un promedio de 0.273 % con una desviación estándar de 0.013 para la muña fresca y 0.905 % con una desviación estándar de 0.012 para la muña seca.

**Cuadro 5.3**

**MUÑA FRESCA - RELACIÓN VOLUMEN / MASA**

N° muestra	Masa, g	Volumen, ml	% Volumen/masa
1	975.00	2.6	0.267
2	1000.00	2.9	0.290
3	1050.00	2.7	0.257
4	975.00	2.6	0.267
5	987.50	2.7	0.273
6	1012.50	2.9	0.286
Promedio			0.273

**Cuadro 5.4**

**MUÑA SECA - RELACIÓN VOLUMEN / MASA**

N° muestra	Masa seca, g	Volumen, ml	% Volumen/masa
1	475.00	4.3	0.905
2	550.00	4.9	0.891
3	525.00	4.7	0.895
4	500.00	4.6	0.920
5	522.50	4.7	0.900
6	512.50	4.7	0.917
Promedio			0.905

### 5.3 Curvas de secado

Los datos experimentales que se han obtenido en las pruebas de secado con aire caliente a temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C y con velocidades de 1 m/s y 2 m/s; son presentados en el Anexo 3.

En estos cuadros, los resultados muestran la variación del peso del sólido húmedo ( $W_{SH}$ ), expresado en gramos, como una función del tiempo de secado ( $\theta$ ), expresado en minutos. Los datos del peso del sólido húmedo ( $W_{SH}$ ) han sido transformados a humedad en base seca ( $X$ ) para poder construir las curvas de secado. (Figuras 5.1 a 5.6).

Figura 5.1

CURVA DE SECADO 40 °C y 1 m/s

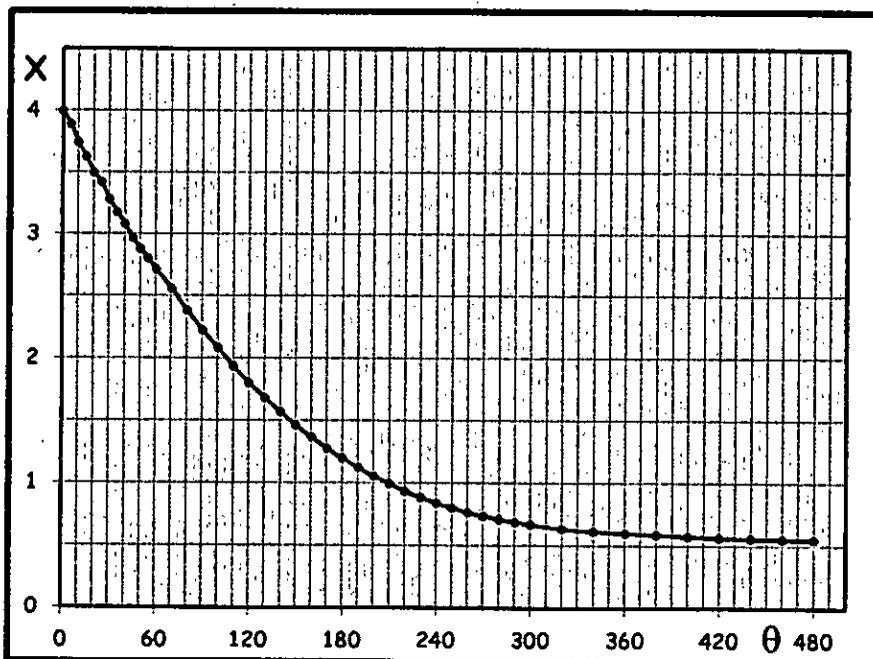


Figura 5.2

CURVA DE SECADO 50 °C y 1 m/s

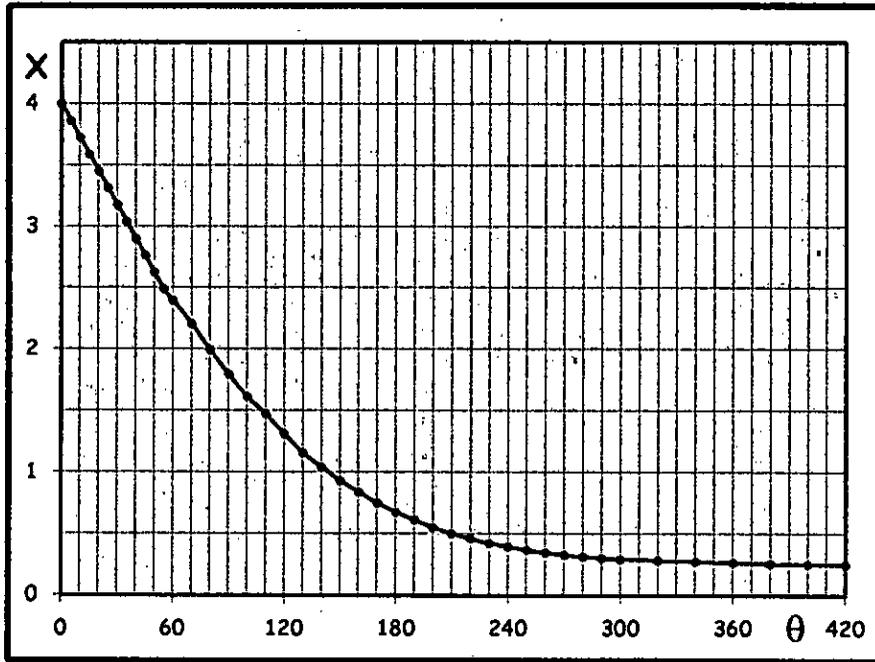


Figura 5.3

CURVA DE SECADO 60 °C and 1 m/s

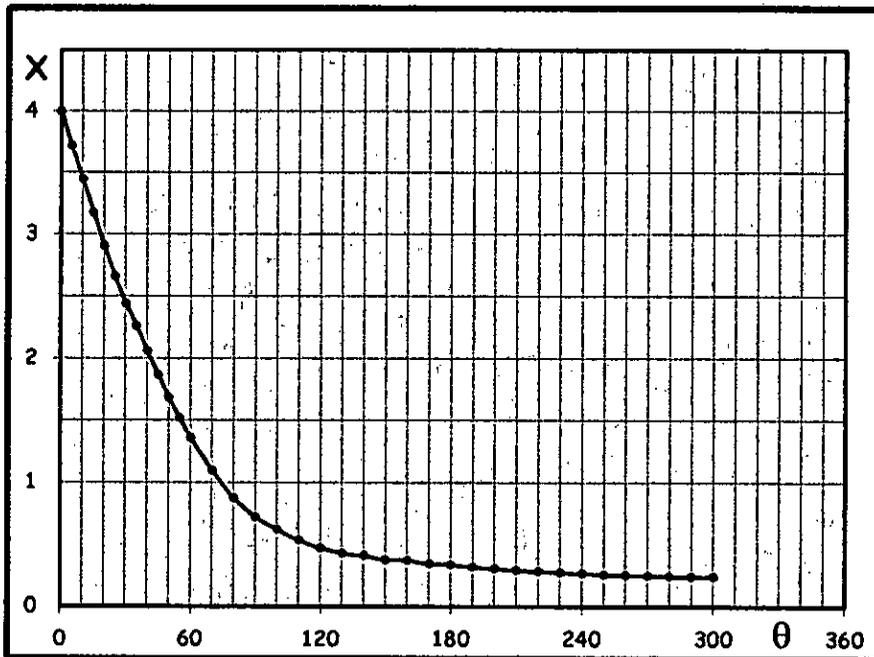


Figura 5.4

CURVA DE SECADO 40 °C y 2 m/s

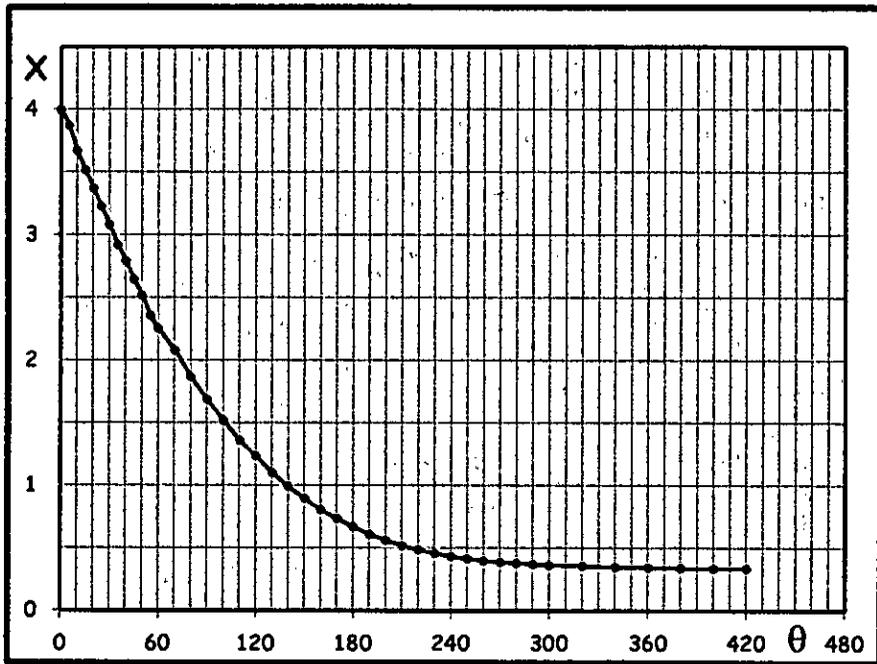
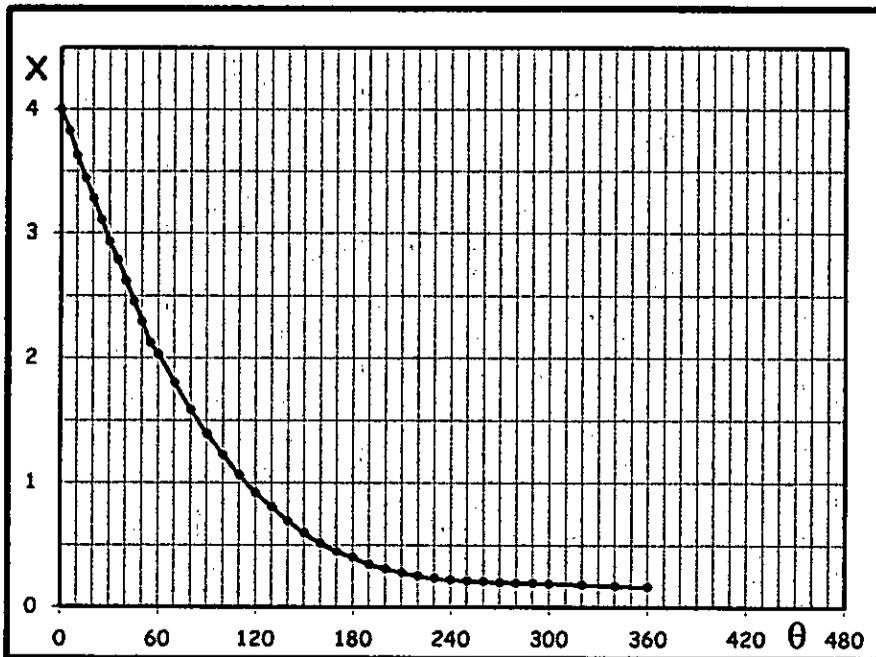


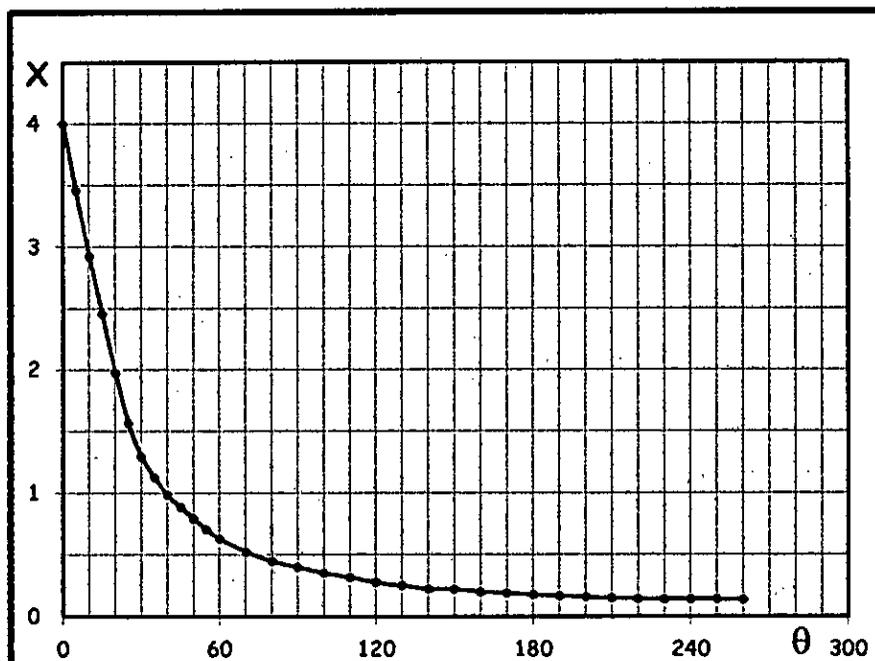
Figura 5.5

CURVA DE SECADO 50 °C y 2 m/s



**Figura 5.6**

**CURVA DE SECADO 60 °C y 2 m/s**



El contenido de humedad crítica ( $X_c$ ), expresado en kg agua/ kg sólido seco, se ha evaluado utilizando las curvas de secado para las diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire y se presenta en el cuadro 5.5.

**Cuadro 5.5**

**CONTENIDO DE HUMEDAD CRÍTICA**

T °C	$X_c$ kg H <sub>2</sub> O/kg ss	
	1 m/s	2 m/s
40	2.7163	2.2556
50	2.3991	2.0323
60	2.4417	1.5715

Para el período de velocidad constante se ha utilizado la zona recta de la curva de secado y se ha aplicado una regresión lineal. Los cálculos de regresión efectuados se presentan en el Anexo 4.

En el cuadro 5.6 se presentan los valores obtenidos para la velocidad de secado constante ( $N_c$ ) para las diferentes temperaturas y velocidades utilizadas en las pruebas experimentales.

**Cuadro 5.6**  
**VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE**

T °C	N <sub>c</sub> = - dX/dθ kg H <sub>2</sub> O/kg ss - min	
	1 m/s	2 m/s
40	0.02157	0.02936
50	0.02718	0.04327
60	0.05234	0.09750

Para el período de velocidad de secado decreciente se ha aplicado el método de la gradiente para el cálculo de la velocidad de secado, representando:  $\Delta X/\Delta\theta = (X_1 - X_2)/(\theta_1 - \theta_2)$  vs  $X_{prom} = (X_1 + X_2)/2$ . Los resultados se presentan en el Anexo 5.

La representación gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad secado ha permitido obtener evaluar el contenido de humedad de equilibrio para las diferentes temperaturas y velocidades utilizadas en las pruebas experimentales.

En las figuras 5.7 a 5.9 se presentan las curvas de velocidad de secado en el período decreciente, cuando el secado se efectuó con aire a una velocidad de 1 m/s.

Figura 5.7

VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE 40 °C y 1 m/s

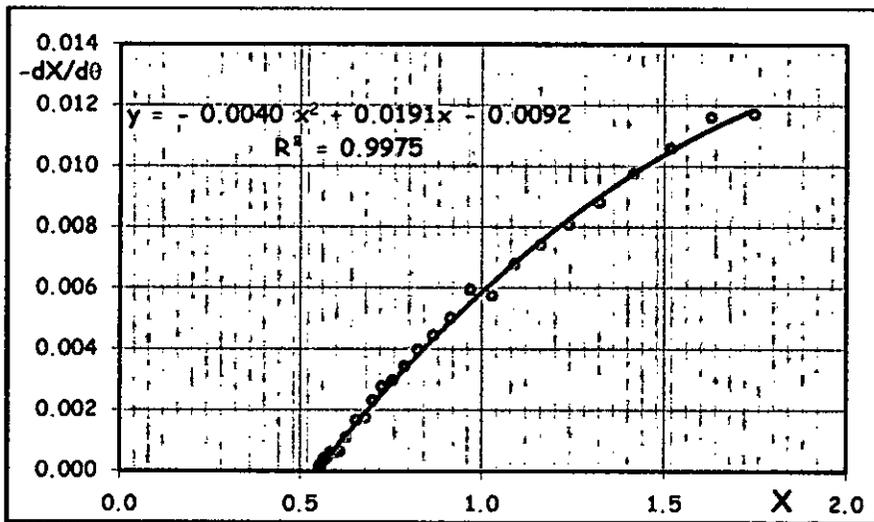


Figura 5.8

VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE 50 °C y 1 m/s

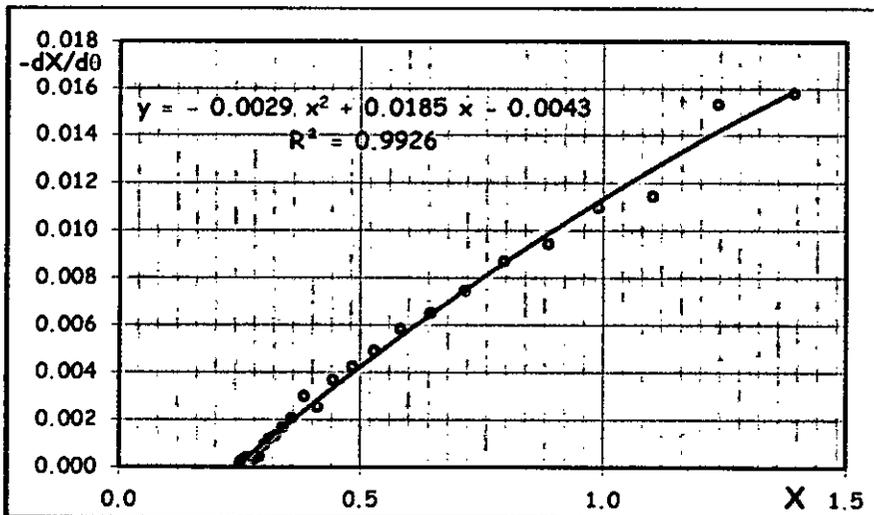
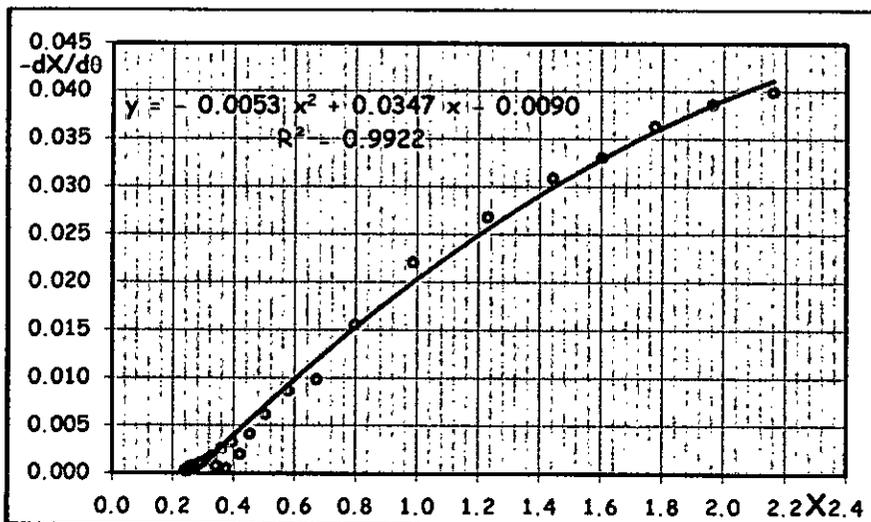


Figura 5.9

VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE 60 °C y 1 m/s



En las figuras 5.10 a 5.12 se presentan las curvas de velocidad de secado en el período decreciente, cuando el secado se efectuó con aire a una velocidad de 2 m/s.

Figura 5.10

VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE 40 °C y 2 m/s

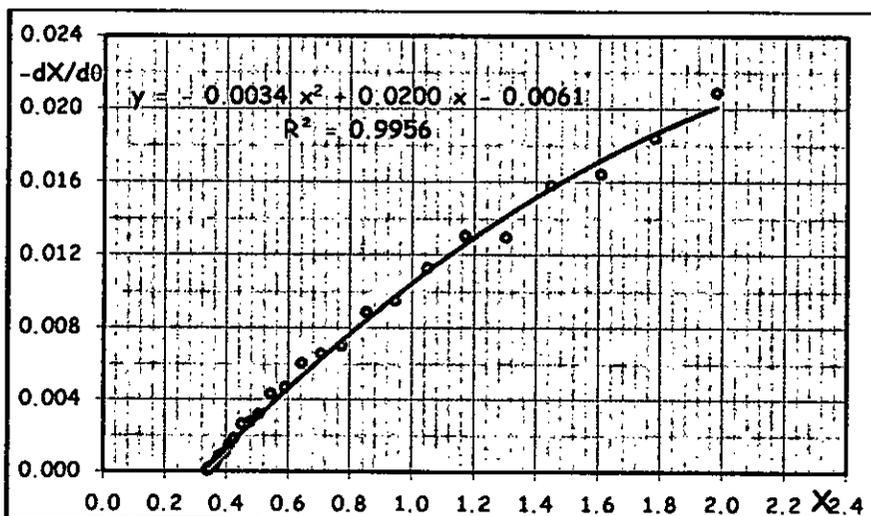


Figura 5.11

VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE 50 °C y 2 m/s

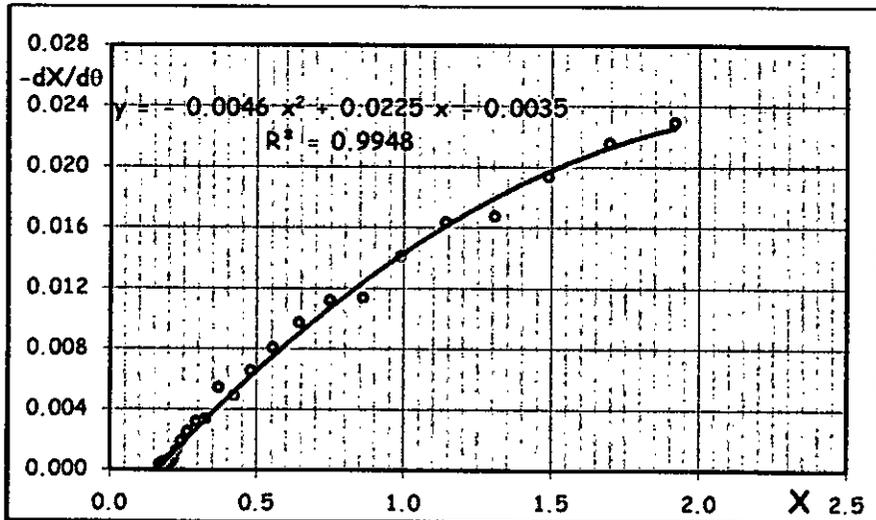
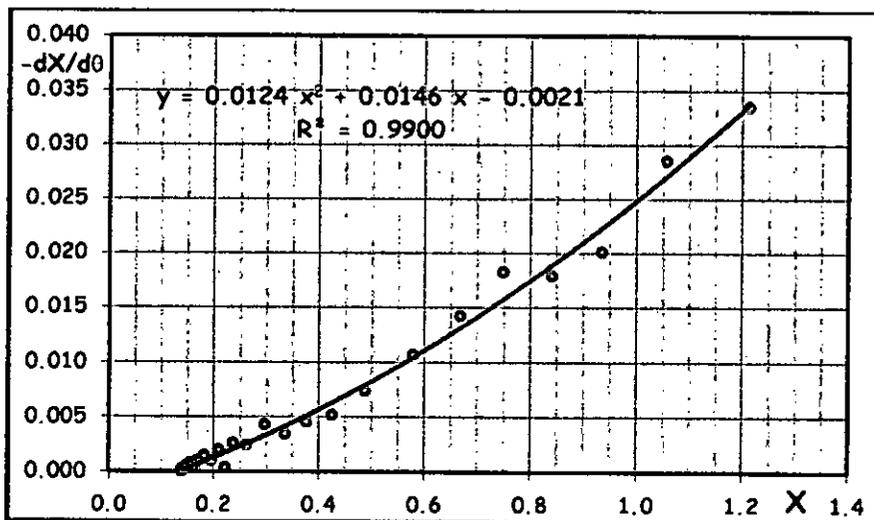


Figura 5.12

VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE 60 °C y 2 m/s



Los resultados obtenidos para la humedad de equilibrio, a las diferentes condiciones se presentan en el cuadro 5.7.

**Cuadro 5.7**

**HUMEDAD DE EQUILIBRIO**

T °C	X* kg H <sub>2</sub> O/kg ss	
	1 m/s	2 m/s
40	0.5500	0.3300
50	0.2400	0.1600
60	0.2200	0.1250

**5.4 Modelado de las curvas de secado**

En el modelado de la cinética del secado, para el período de velocidad decreciente, se ha aplicado el modelo difusional que relaciona una fuerza impulsora, definida por la razón  $RH = (X^* - X)/(X^* - X_0)$ , como una función del tiempo. La aplicación de este modelo, cuyos cálculos se presentan en el Anexo 6, ha permitido evaluar los coeficientes de difusividad, tal como se muestra en el cuadro 5.8.

**Cuadro 5.8**

**COEFICIENTES DE DIFUSIVIDAD**

T °C	D <sub>w</sub> m <sup>2</sup> /s	
	1 m/s	2 m/s
40	2.19 E-09	2.62 E-09
50	2.42 E-09	2.94 E-09
60	3.08 E-09	3.62 E-09

Se han correlacionado los valores obtenidos de la difusividad con la temperatura, aplicando el modelo de Arrhenius.  $D_w = D_{w0} \cdot e^{-E_a/R.T}$ . Los cálculos, que se presentan en el Anexo 7, han permitido evaluar la energía de activación que figuran en el cuadro 5.9.

**Cuadro 5.9**

**ENERGÍA DE ACTIVACIÓN**

T °C	E <sub>a</sub> kJ/mol	
	1 m/s	2 m/s
40 - 60	6.38	6.11

La modelación matemática para el secado convectivo de la muña se realizó utilizando los modelos de **Newton**, **Page**, **Page modificado I**, **Page modificado II**, **Henderson & Pabis**, **Henderson & Pabis modificado**, **Midilli**, **Dos términos**, **Exponencial de dos términos**, **Thompson et al.**, **Wang & Singh** y **Aproximación a difusión**. Los modelos fueron sometidos a un ajuste con los datos experimentales y los resultados obtenidos de las constantes para cada modelo se presentan en los cuadros 5.10 y 5.11.

Para la selección del modelo que se ajusta a los resultados experimentales a las diferentes condiciones de temperatura y velocidad se aplicaron pruebas estadísticas cuyos resultados se presentan en los cuadros 5.12 a 5.14.

**Cuadro 5.10**

**CONSTANTES DE MODELOS a 1 m/s**

Modelo	Constante	40 °C	50 °C	60 °C
Newton	k =	0.008811	0.010470	0.019666
Page	k =	0.004102	0.003789	0.010302
	n =	1.158777	1.219538	1.163232
Page Modificado I	k =	0.007125	0.007767	0.016527
	n =	1.236530	1.347920	1.189941
Page Modificado II	k =	0.008712	0.010339	0.019578
	n =	1.158564	1.219342	1.163514
Henderson & Pabis	k =	0.009237	0.011225	0.020662
	a =	1.042031	1.063888	1.045055
Henderson & Pabis modificado	k =	0.009237	0.011224	0.020662
	k <sub>0</sub> =	0.009237	0.011224	0.020662
	k <sub>1</sub> =	0.009234	0.011228	0.020661
	a =	0.347068	0.352919	0.348350
	b =	0.347068	0.352919	0.348350
	c =	0.347873	0.358057	0.348352
Midilli	k =	0.003527	0.003426	0.008998
	n =	1.180775	1.235172	1.195746
	a =	0.978747	0.986055	0.989105
	b =	-0.000031	-0.00002	0.000025
Dos términos	k <sub>1</sub> =	0.0092362	0.011225	0.020662
	k <sub>2</sub> =	0.0092362	0.011225	0.020662
	a =	0.5210081	0.531945	0.522527
	b =	0.5210081	0.531945	0.522527
Exponencial de dos términos	k =	0.011659	0.014595	0.026567
	a =	1.678759	1.763005	1.699877
Thompson et al.	A =	0.088442	0.095415	0.126825
	b =	0.791886	0.757879	0.653543
Wang & Singh	a =	-0.00596	-0.006972	-0.011048
	b =	0.000009	0.000012	0.000028
Aproximación a difusión	k =	0.005402	0.017629	0.014194
	a =	11.09992	11.09954	11.09945
	b =	0.953002	1.063008	0.968674

Cuadro 5.11

## CONSTANTES DE MODELOS a 2 m/s

Modelo	Constante	40 °C	50 °C	60 °C
Newton	k =	0.011547	0.012879	0.036171
Page	k =	0.005166	0.005663	0.039551
	n =	1.177436	1.186188	0.973798
Page Modificado I	k =	0.009627	0.038526	0.020425
	n =	1.199401	0.334287	1.770885
Page Modificado II	k =	0.011424	0.012756	0.036258
	n =	1.177227	1.186007	0.974086
Henderson & Pabis	k =	0.012247	0.013675	0.03656
	a =	1.053216	1.054489	1.009817
Henderson & Pabis modificado	k =	0.012245	0.013672	0.034635
	k <sub>0</sub> =	0.012245	0.013672	0.034635
	k <sub>1</sub> =	0.012249	0.013681	0.040938
	a =	0.354191	0.352751	0.336772
	b =	0.354191	0.352751	0.336772
	c =	0.34483	0.348991	0.337201
Midilli	k =	0.004891	0.005274	0.042279
	n =	1.183882	1.196576	0.963512
	a =	0.988837	0.987661	1.022605
	b =	-0.000024	-0.000022	0.000045
Dos términos	k <sub>1</sub> =	0.0122466	0.0136745	0.0365589
	k <sub>2</sub> =	0.0122466	0.0136745	0.0365589
	a =	0.5266146	0.5272325	0.5048984
	b =	0.5266146	0.5272325	0.5048984
Exponencial de dos términos	k =	0.015582	0.017543	0.033443
	a =	1.708207	1.721146	1.000059
Thompson et al.	A =	0.099769	0.103245	0.139121
	b =	0.730301	0.698329	0.40808
Wang & Singh	a =	-0.007319	-0.008372	-0.014276
	b =	0.000013	0.000017	0.000044
Aproximación a difusión	k =	0.007266	0.020998	0.03617
	a =	11.09990	11.09983	0.474879
	b =	0.955829	1.057773	1.000081

Cuadro 5.12

## PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE MODELOS A 40 °C

Modelo	1 m/s				2 m/s			
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	MSE	RMSE
Newton	0.992170	0.992170	0.000708	0.026615	0.992738	0.992738	0.000773	0.027802
Page	0.998777	0.998749	0.000130	0.011423	0.999390	0.999375	0.000065	0.008056
Page Modificado I	0.994868	0.994721	0.000475	0.021790	0.992738	0.992561	0.000773	0.027802
Page Modificado II	0.998777	0.998749	0.000130	0.011423	0.999390	0.999375	0.000065	0.008056
Henderson & Pabis	0.991552	0.991361	0.000901	0.030022	0.990733	0.990507	0.000987	0.031415
Henderson & Pabis modificado	0.994986	0.994359	0.000535	0.023129	0.995518	0.994912	0.000477	0.021847
Midilli	0.999381	0.999337	0.000066	0.008125	0.999622	0.999593	0.000040	0.006345
Dos Términos	0.994986	0.994628	0.000535	0.023129	0.995518	0.995173	0.000477	0.021847
Exponencial de dos términos	0.998926	0.998901	0.000115	0.010703	0.999357	0.999341	0.000068	0.008274
Thompson et al.	0.822206	0.818165	0.018961	0.137698	0.823338	0.819029	0.018808	0.137141
Wang & Singh	0.984895	0.984552	0.001613	0.040160	0.968705	0.967942	0.003338	0.057779
Aproximación a difusión	0.998522	0.998453	0.000158	0.012557	0.998114	0.998020	0.000201	0.014169

Cuadro 5.13

## PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE MODELOS A 50 °C

Modelo	1 m/s				2 m/s			
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	MSE	RMSE
Newton	0.989569	0.989569	0.001152	0.033938	0.992287	0.992287	0.000816	0.028567
Page	0.999455	0.999442	0.000060	0.007756	0.999458	0.999444	0.000057	0.007572
Page Modificado I	0.989569	0.989314	0.001152	0.033938	0.992287	0.992084	0.000816	0.028567
Page Modificado II	0.999455	0.999442	0.000060	0.007756	0.999458	0.999444	0.000057	0.007572
Henderson & Pabis	0.986666	0.986341	0.001474	0.038393	0.990178	0.989919	0.001040	0.032244
Henderson & Pabis modificado	0.993754	0.992910	0.000690	0.026268	0.995168	0.994457	0.000511	0.022616
Midilli	0.999691	0.999668	0.000034	0.005837	0.999662	0.999634	0.000036	0.005980
Dos Términos	0.993754	0.993273	0.000690	0.026268	0.995168	0.994765	0.000512	0.022616
Exponencial de dos términos	0.999323	0.999306	0.000075	0.008648	0.999422	0.999406	0.000061	0.007822
Thompson et al.	0.810537	0.805915	0.020919	0.144635	0.821701	0.817009	0.018868	0.137362
Wang & Singh	0.983060	0.982647	0.001872	0.043266	0.974064	0.973382	0.002748	0.052424
Aproximación a difusión	0.999547	0.999524	0.000050	0.007073	0.999588	0.999566	0.000044	0.006601

Cuadro 5.14

## PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE MODELOS A 60 °C

Modelo	1 m/s				2 m/s			
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	MSE	RMSE
Newton	0.994868	0.994868	0.000475	0.021790	0.995121	0.995121	0.000332	0.018231
Page	0.999248	0.999226	0.000070	0.008343	0.995241	0.995088	0.000324	0.018003
Page Modificado I	0.994868	0.994721	0.000475	0.021790	0.995121	0.994963	0.000332	0.018231
Page Modificado II	0.999248	0.999226	0.000070	0.008343	0.995241	0.995088	0.000324	0.018003
Henderson & Pabis	0.993524	0.993339	0.000600	0.024485	0.995061	0.994902	0.000337	0.018345
Henderson & Pabis Modificado	0.996578	0.996026	0.000317	0.017795	0.995325	0.994459	0.000318	0.017844
Midilli	0.999410	0.999356	0.000055	0.007389	0.996072	0.995666	0.000267	0.016351
Dos Términos	0.996578	0.996267	0.000317	0.017795	0.995199	0.994702	0.000327	0.018084
Exponencial de dos términos	0.999381	0.999364	0.000057	0.007566	0.991732	0.991465	0.000563	0.023726
Thompson et al.	0.849894	0.845606	0.013909	0.117936	0.908676	0.905730	0.006229	0.078922
Wang & Singh	0.901018	0.898190	0.009228	0.096060	0.570759	0.556913	0.030604	0.174941
Aproximación a difusión	0.996696	0.996501	0.000306	0.017486	0.995121	0.994795	0.000332	0.018231

## **VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1 Contratación de hipótesis con los resultados**

#### **6.1.1 Composición química de la muña**

La caracterización de las hojas de muña fresca en lo referente a los componentes químicos mayores, mostrados en el cuadro 9, nos señala que tienen un elevado contenido de agua y en orden de concentración siguen los carbohidratos y las proteínas, las cenizas y las grasas. Así el agua está presente en un 80 %, los carbohidratos en un 15.69 %, y en menores proporciones las proteínas en un 2.35%, las cenizas en un 1.45 % y las grasas en un 0.51 %.

En cuanto a los resultados obtenidos para las hojas de muña seca, presentados en el cuadro 9, nos señalan que debido a la reducción del contenido de agua se origina una elevación de la concentración de los otros nutrientes.

En el producto seco, estos nutrientes están presentes en una mayor concentración, así los carbohidratos elevan su contenido a un 71.30 %, las proteínas a un 10.60 %, las cenizas a un 6.40 % y las grasas a un 1.70 %.

Para una mejor comparación de estos análisis químicos los resultados obtenidos se han transformado a base seca, es decir sin tomar en cuenta el contenido de humedad, los que se presentan en el cuadro 6.1.

**Cuadro 6.1**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUÑA EN BASE SECA**  
**(Por 100 g de parte comestible)**

<b>Componente</b>	<b>Muña fresca</b>	<b>Muña seca</b>
<b>Proteína</b>	<b>11.75</b>	<b>11.78</b>
<b>Grasa</b>	<b>2.55</b>	<b>1.89</b>
<b>Ceniza</b>	<b>7.25</b>	<b>7.11</b>
<b>Carbohidratos</b>	<b>78.45</b>	<b>79.22</b>
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

Se puede observar que el contenido de grasas en la muña seca ha disminuido con respecto al contenido de grasas en la muña fresca. Esto puede deberse al efecto del secado, al utilizar un gas caliente se han volatilizado parcialmente los aceites esenciales que contiene la muña y esto explica dicha variación. Los contenidos de los otros nutrientes son muy parecidos y las pequeñas diferencias se deben al cambio en el contenido de grasas.

### **6.1.2 Contenido de aceite esencial**

En lo que respecta al contenido de aceites esenciales, el rendimiento de separación del aceite esencial se ha obtenido

relacionando el volumen de aceite en mililitros y el peso de las hojas en gramos, expresándolo como un porcentaje. Se ha obtenido un rendimiento de separación de un 0.273 % y de 0.905 % para las hojas de muña fresca y seca respectivamente, observándose aparentemente un mayor rendimiento en el caso de las hojas de muña seca.

Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la cantidad inicial de hojas de muña fresca requerida para obtener las hojas secas es mucho mayor, por lo cual el rendimiento de separación realmente es menor, tal como se puede observar en el cuadro 6.2.

**Cuadro 6.2**

**MUÑA SECA – RELACIÓN VOLUMEN/MASA HÚMEDA EQUIVALENTE**

<b>N° muestra</b>	<b>Masa seca, g</b>	<b>Masa húmeda equivalente, g</b>	<b>Volumen, ml</b>	<b>% Volumen/masa</b>
1	475.00	2137.50	4.3	0.201
2	550.00	2475.00	4.9	0.198
3	525.00	2362.50	4.7	0.199
4	500.00	2250.00	4.6	0.204
5	522.50	2351.25	4.7	0.200
6	512.50	2306.25	4.7	0.204
			<b>Promedio</b>	<b>0.201</b>

El rendimiento obtenido es del 0.201 % con una desviación estándar de 0.003. Este resultado, comparado con el

rendimiento obtenido para la muña fresca, representa una reducción del rendimiento en un 35.99 %, lo que significa que durante el secado hay una pérdida del contenido de aceite esencial.

### **6.1.3 Curvas de secado**

Los resultados experimentales de las pruebas de secado permitieron representar gráficamente la variación del contenido de humedad, expresado en base seca, como una función del tiempo de secado.

Estas representaciones gráficas, en todos los casos, nos muestran que el secado de las hojas de muña abarca los tres períodos de secado: el período de inducción, el período de velocidad de secado constante y el período de velocidad de secado decreciente.

El período de inducción, que es un período de acondicionamiento de las hojas de muña a las condiciones de la cámara de secado es un período muy corto, por lo cual no se considera de modo independiente, sino que forma parte del período de velocidad de secado constante, para efectos del diseño de un secador.

Los efectos de la temperatura y de la velocidad del aire sobre la velocidad de secado se pueden observar en las curvas de secado presentadas en las figuras 6.1 y 6.2.

Figura 6.1

CURVA DE SECADO A TEMPERATURAS DE 40 - 60 °C

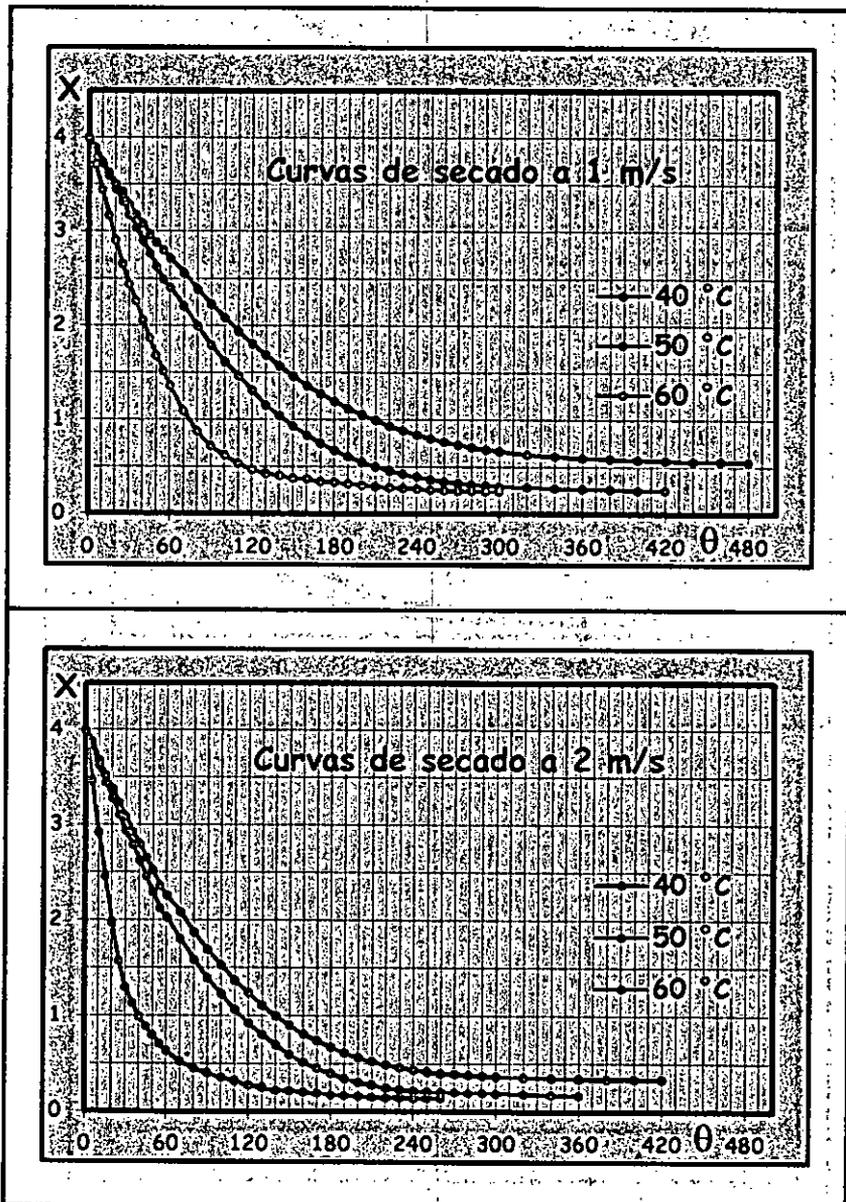
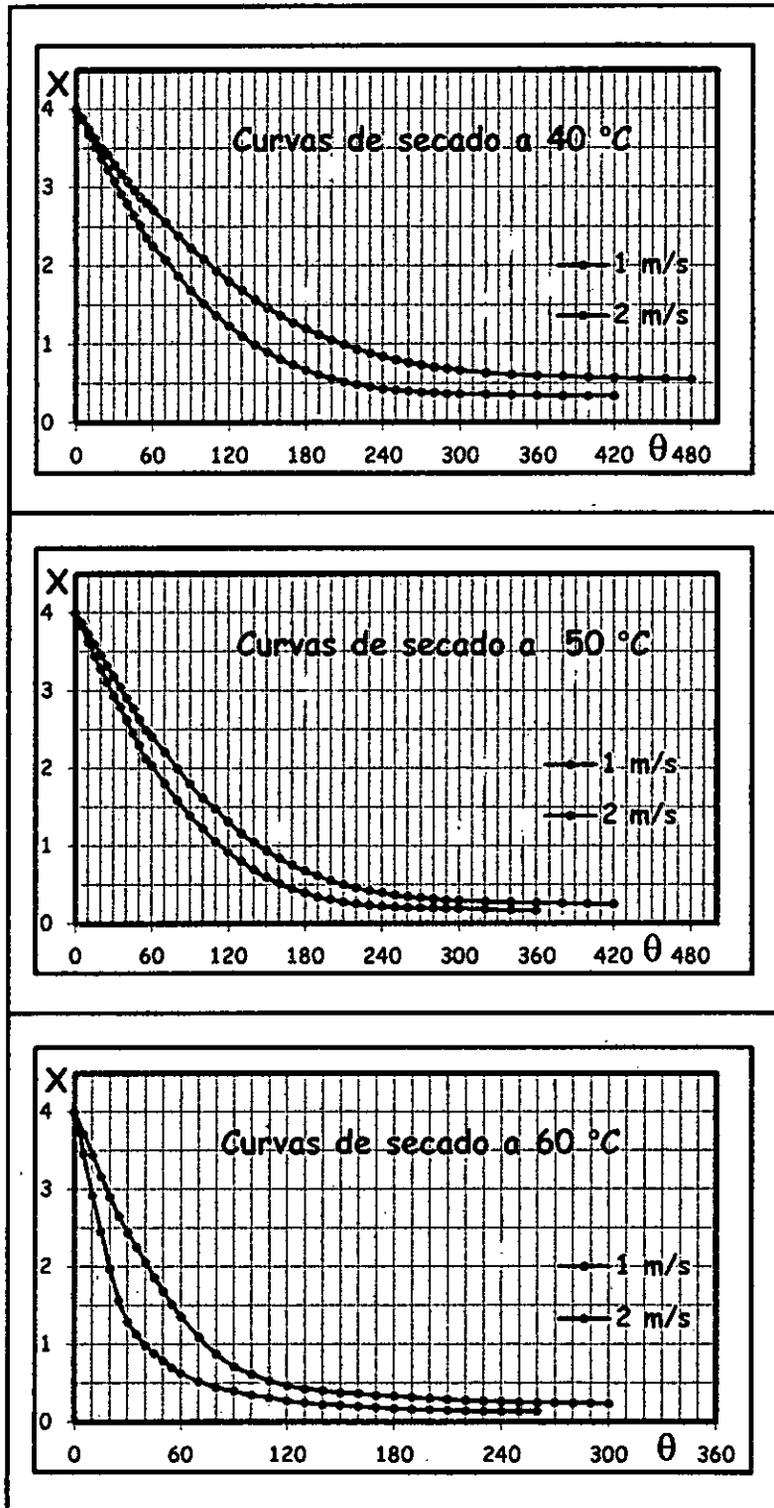


Figura 6.2

CURVA DE SECADO A VELOCIDADES DE 1 m/s y 2 m/s



Una comparación de las curvas de velocidad de secado para las temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C, y a las velocidades de 1 m/s y 2 m/s, permite apreciar que, al incrementarse la temperatura, la velocidad de evaporación de la humedad también se incrementa y por tanto se reduce el tiempo total de secado.

La velocidad de secado en el período constante es controlada por los mecanismos de transferencia de calor, mientras en el período decreciente, es controlada por la transferencia de masa.

En lo referente a la duración de cada período de secado, el período de velocidad constante de secado tiene una duración menor que el período de velocidad decreciente. El período de velocidad constante de secado concluye cuando se alcanza el contenido de humedad crítica ( $X_c$ ) y se da inicio al período de velocidad decreciente de secado.

La influencia de la temperatura de secado, según se muestra en la figura 6.1, presenta un efecto positivo sobre el tiempo de secado.

Tanto para las velocidades de aire de 1 m/s y 2 m/s, a mayor temperatura la velocidad de secado es mayor y por tanto se

alcanza la humedad de equilibrio en un menor tiempo, lo cual es indicativo que a mayor temperatura se requerirán menores tiempos de secado.

Del mismo modo, la influencia de la velocidad del aire, según se muestra en la figura 6.2, también presenta un efecto positivo sobre el tiempo de secado. Para las temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C, la velocidad de secado es mayor a 2 m/s comparado con la velocidad de 1 m/s, dado que a mayor velocidad de aire se requiere un tiempo menor para alcanzar la humedad de equilibrio. Esto nos indica que a mayor velocidad del aire se requerirán menores tiempos de secado.

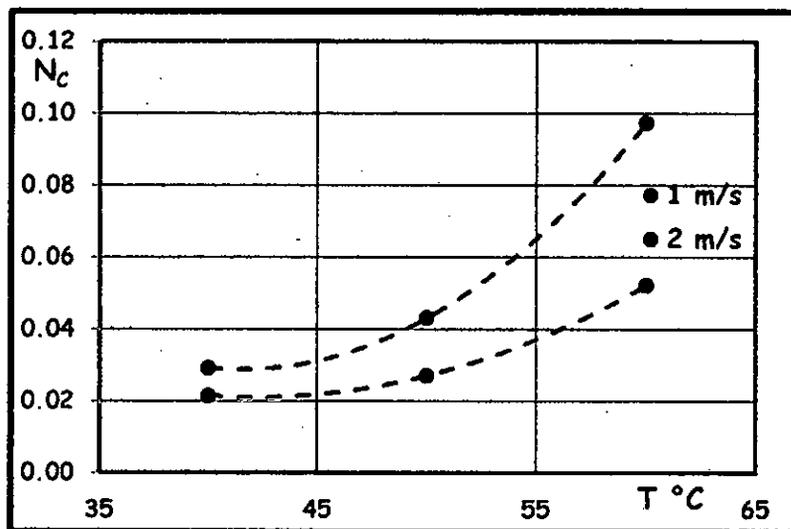
#### **6.1.4. Modelado de las curvas de secado**

Las curvas de secado representadas con los datos experimentales han servido para obtener datos sobre la velocidad de secado y construir las curvas de velocidad de secado. Estas han permitido constatar lo observado en las curvas de secado, es decir que en el secado de las hojas de muña se presentan los tres períodos mencionados anteriormente. En la figura 6.3 se presentan los valores de la velocidad de secado en el período constante en función de la

temperatura para las velocidades del aire de 1 m/s y 2 m/s. Los valores de velocidad de secado constante son mayores para la velocidad del aire a 2 m/s.

Figura 6.3

VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE



En ambos casos, la velocidad de secado constante está influenciada positivamente por la temperatura; la velocidad de secado constante aumenta con el incremento de la temperatura.

En el período de velocidad de secado decreciente, las curvas de velocidad de secado obtenidas nos muestran que la velocidad de secado decrece hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Esto indica que la velocidad de secado varía con el contenido de humedad libre, que representa la cantidad de

humedad que podría eliminarse y que viene dado por la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio.

Aplicando el modelo difusional, los datos experimentales correspondientes al período de velocidad de secado decreciente, han permitido evaluar la difusividad efectiva a temperaturas que oscilan entre 40 °C y 60 °C, para velocidades del aire de 1 m/s y 2 m/s.

Dentro del rango de 40°C a 60°C, se han obtenido valores de 2.19 E-09 a 3.08 E-09 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 1 m/s y de 2.62 E-09 a 3.68 E-09 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 2 m/s. Los resultados muestran que los valores de la difusividad efectiva son mayores para una velocidad de 2 m/s y que, para ambas velocidades del aire, éstas se incrementan a mayores valores de temperatura.

Los datos obtenidos para la difusividad efectiva se han utilizado en la evaluación de la energía de activación aplicando el modelo de Arrhenius y encontrar una correlación con la temperatura.

En lo que respecta al modelado de la curva de secado, se realizó un ajuste de los datos experimentales de la razón de

humedad RH como una función del tiempo, para los doce modelos matemáticos propuestos en cuadro 2.3. Se han evaluado los coeficientes y constantes correspondientes a cada modelo mediante el programa matemático para ecuaciones no lineales Polymath 6.10 Professional Release, los que se han presentado en los cuadros 5.10 y 5.11.

Este programa además permite la representación gráfica de los datos calculados con la función obtenida y contrastarla con los datos experimentales ( $RH_{\text{experimental}}$  vs  $RH_{\text{calculado}}$ ), por lo que se puede establecer gráficamente si un modelo es adecuado para representar los datos experimentales. (Anexo 8).

Además, se han calculado los coeficientes de determinación  $R^2$  y  $R^2_{\text{adj}}$ , y se realizó el análisis de residuales tales como error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), presentados en los cuadros 5.12 a 5.14.

Se han utilizado estos parámetros estadísticos para la selección de los modelos que correlacionaban adecuadamente los datos experimentales del secado de las hojas de muña, tomando como criterio de selección los valores más altos para los coeficientes de determinación  $R^2$  y  $R^2_{\text{adj}}$ , y los menores valores de MSE y RMSE.

Para todas las condiciones de temperatura y velocidad del aire en las que se realizaron las pruebas experimentales, los valores obtenidos de los coeficientes de determinación  $R^2$  y  $R^2_{adj}$  son mayores a 0.99 en todos los modelos propuestos con excepción del modelo de Thompson que arroja valores menores a 0.83, por lo que este modelo se ha descartado. Estos valores de los coeficientes de determinación permiten suponer que la mayor parte de estos modelos presentaban un adecuado ajuste a los datos experimentales.

Sin embargo, para discriminar si estos modelos eran adecuados o no, se requiere evaluar los resultados obtenidos para los parámetros del error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Basado en los valores más pequeños obtenidos para el MSE y RMSE, se ha encontrado que los modelos más adecuados para representar los datos experimentales son el modelo de Page, el modelo de Page modificado II, el modelo Exponencial de dos términos y el modelo de Midilli.

En las figuras 6.4 a 6.9 se presentan las curvas de secado para cada una de las pruebas experimentales contrastando los valores experimentales y los valores calculados para los modelos seleccionados.

Figura 6.4

CURVA DE SECADO – VALOR CALCULADO A 40°C y 1 m/s

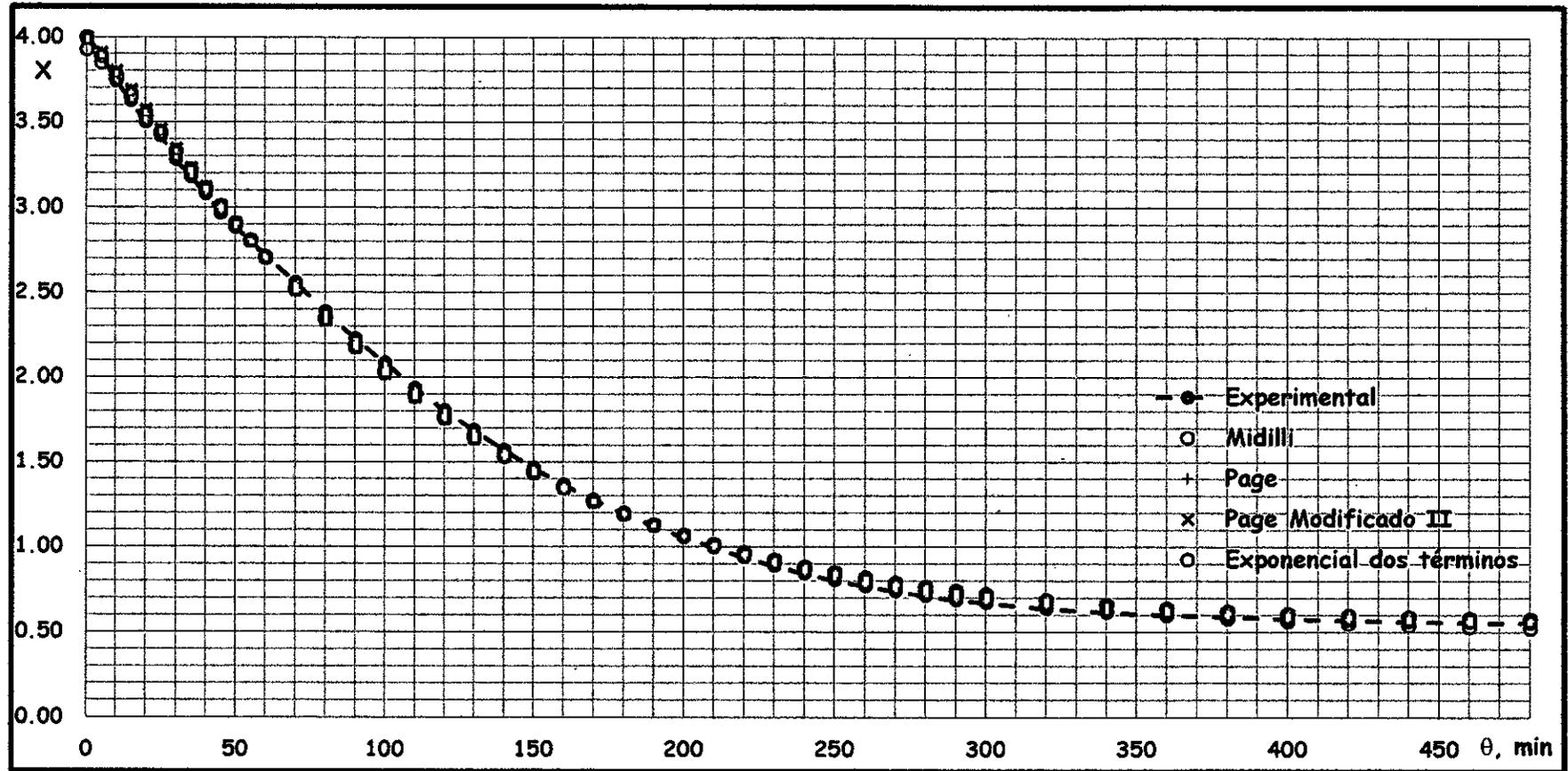


Figura 6.5

CURVA DE SECADO - VALOR CALCULADO A 40°C Y 2 m/s

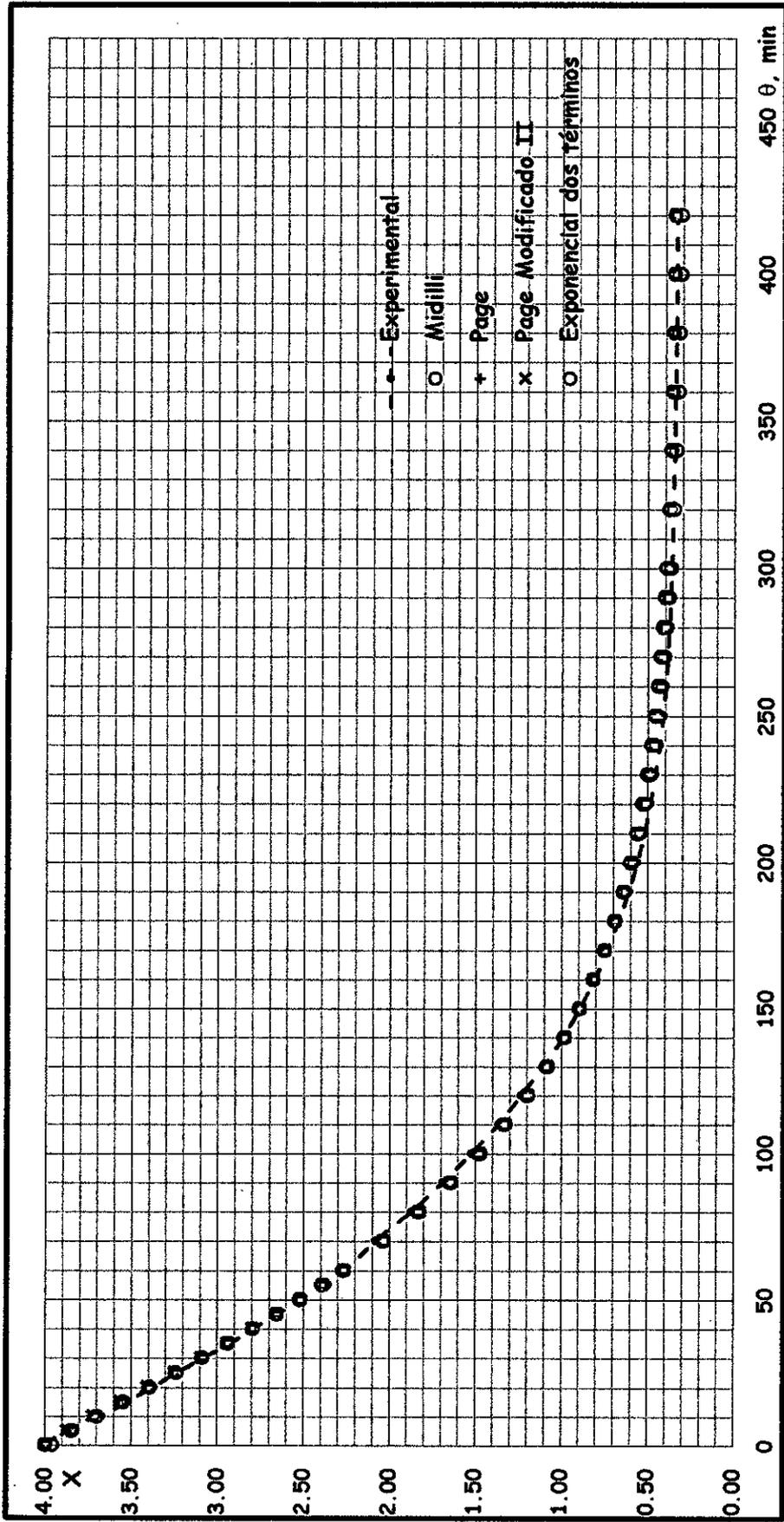


Figura 6.6

CURVA DE SECADO – VALOR CALCULADO A 50°C y 1 m/s

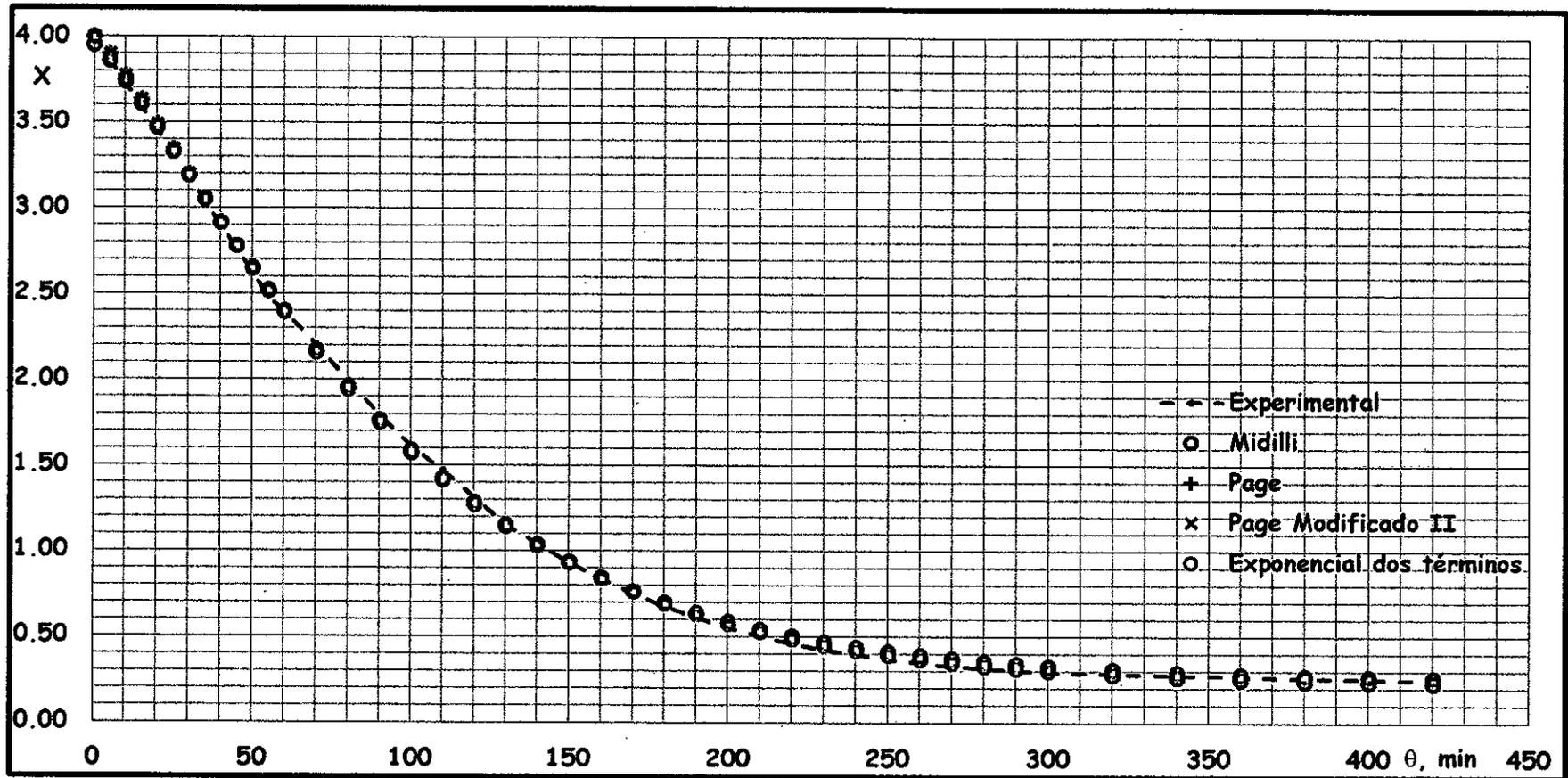


Figura 6.7

CURVA DE SECADO – VALOR CALCULADO A 50°C y 2 m/s

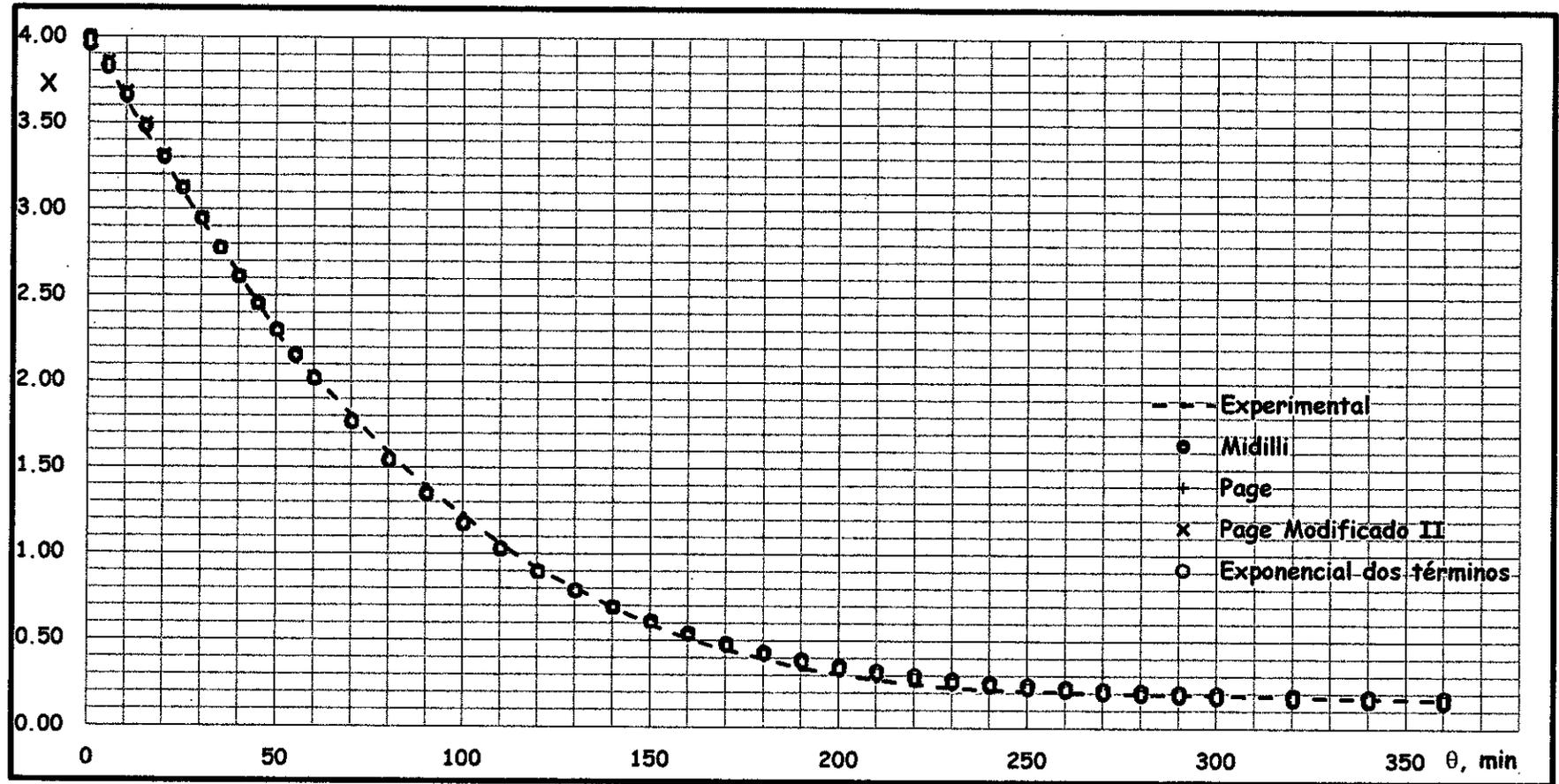


Figura 6.8

CURVA DE SECADO – VALOR CALCULADO A 60°C y 1 m/s

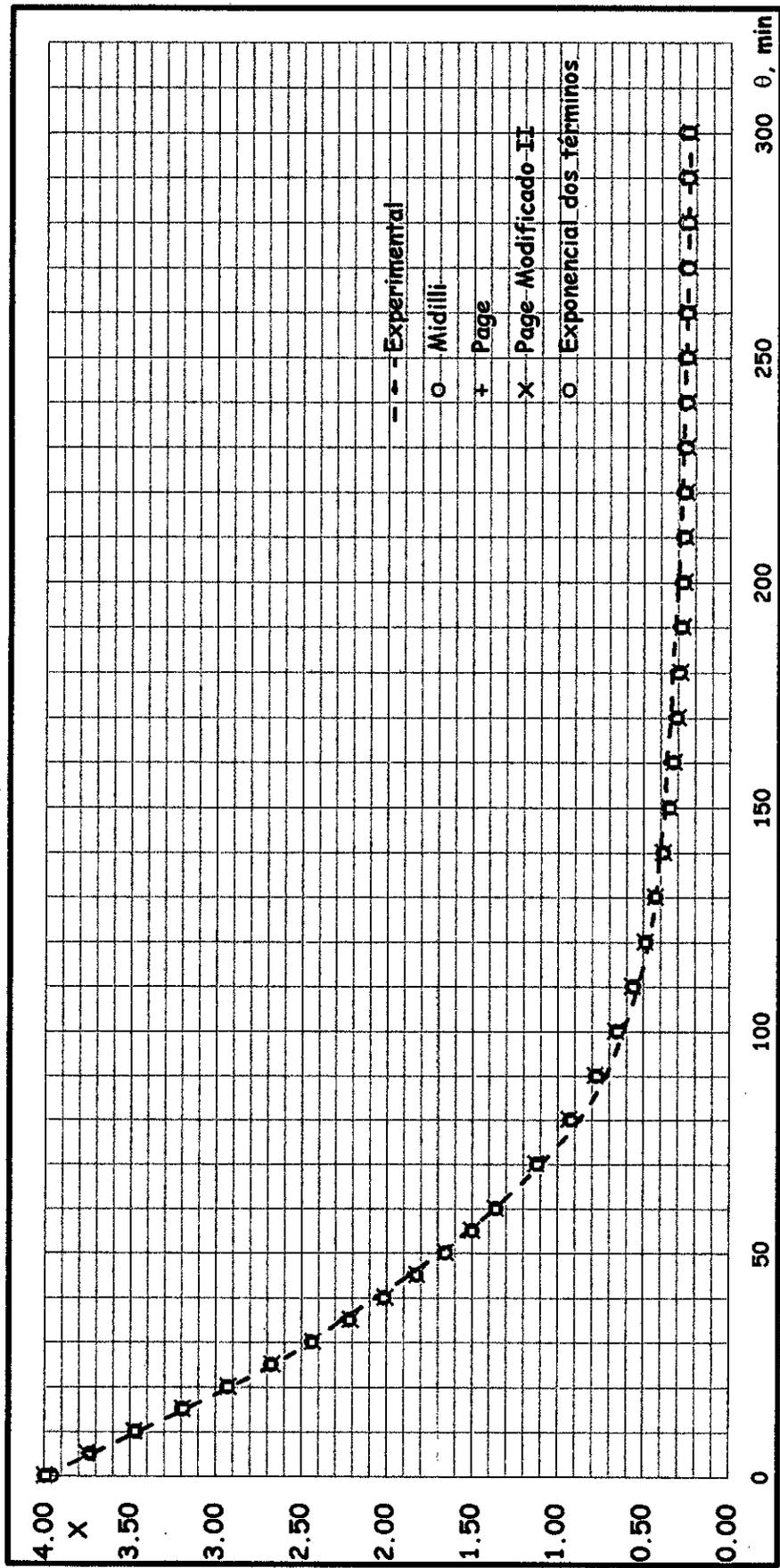
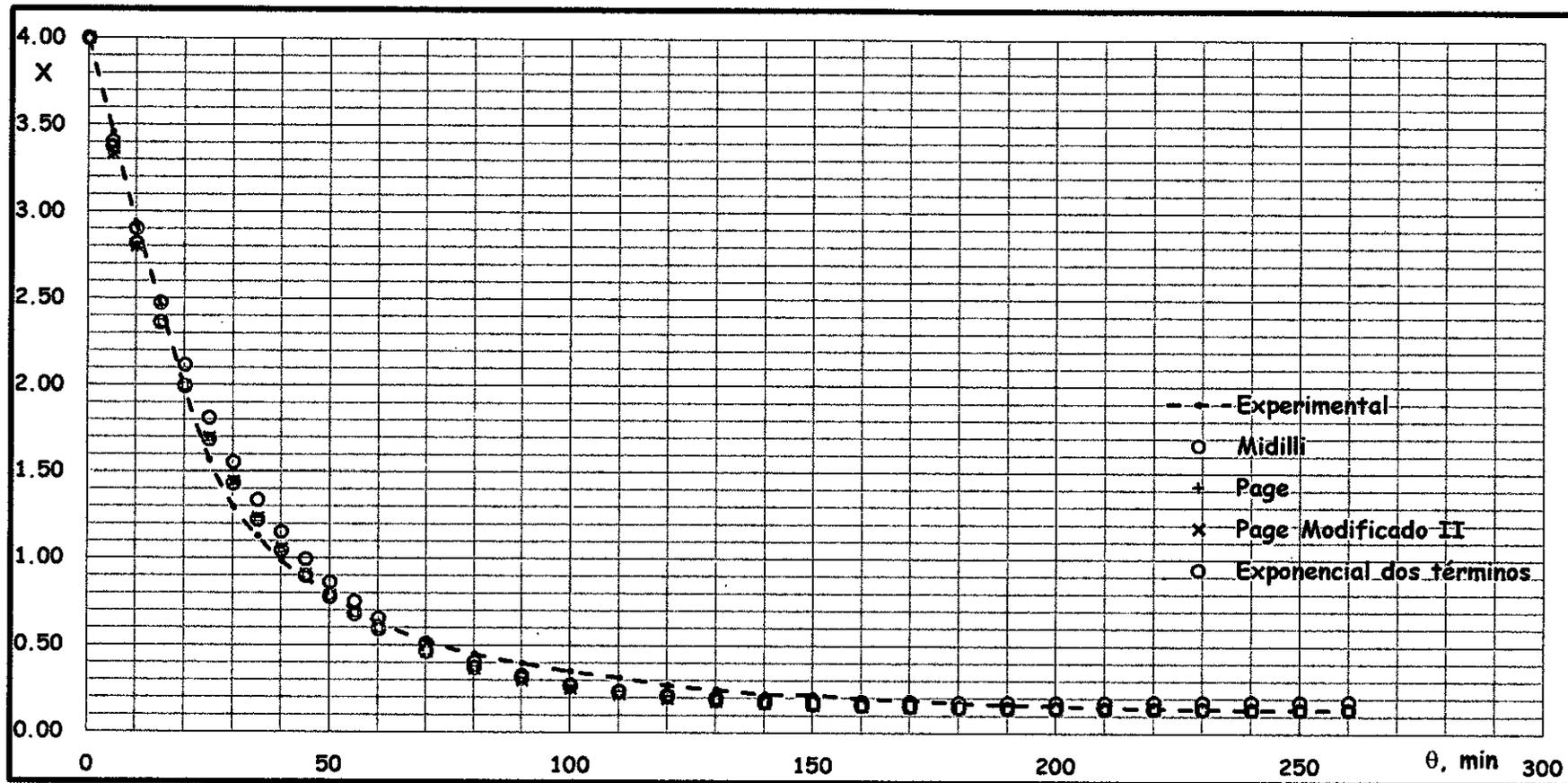


Figura 6.9

CURVA DE SECADO – VALOR CALCULADO A 60°C y 2 m/s



La representación gráfica de las curvas de secado para los cuatro modelos seleccionados nos indica que presentan un buen ajuste por lo que para seleccionar el modelo adecuado se utilizaron los parámetros estadísticos evaluados para cada modelo.

En base a estos parámetros estadísticos se ha determinado que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales obtenidos, para las temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C y velocidades de aire de 1 m/s y 2 m/s, fue el modelo de Midilli, seguido del modelo de Page. Las ecuaciones obtenidas para el modelo de Midilli se muestran en el cuadro 6.3.

**Cuadro 6.3**

**ECUACIONES DEL MODELO DE MIDILLI**

	<b>Velocidad del aire 1 m/s</b>
<b>40°C</b>	$RH = 0.978747 e^{-0.003527 \theta^{1.180775}} - 0.000031 \theta$
<b>50°C</b>	$RH = 0.986055 e^{-0.003426 \theta^{1.235172}} - 0.000020 \theta$
<b>60°C</b>	$RH = 0.989105 e^{-0.008998 \theta^{1.195746}} + 0.000025 \theta$
	<b>Velocidad del aire 2 m/s</b>
<b>40°C</b>	$RH = 0.988837 e^{-0.004891 \theta^{1.183882}} - 0.000024 \theta$
<b>50°C</b>	$RH = 0.987661 e^{-0.005274 \theta^{1.196576}} - 0.000022 \theta$
<b>60°C</b>	$RH = 1.022605 e^{-0.042279 \theta^{0.963512}} + 0.000045 \theta$

Finalmente se ha aplicado una regresión lineal para obtener una correlación de las constantes del modelo de Midilli con la temperatura, los cuales se muestran en el cuadro 6.4.

**Cuadro 6.4**

**MODELO DE MIDILLI – CORRELACIÓN DE CONSTANTES  
CON LA TEMPERATURA**

<b>Velocidad del aire 1 m/s</b>
$k = 2.8365 \text{ E-}05 \theta^2 - 2.5629 \text{ E-}03 \theta + 6.0661 \text{ E-}02$
$n = - 4.6912 \text{ E-}04 \theta^2 + 4.7660 \text{ E-}02 \theta + 2.4967 \text{ E-}02$
$a = - 2.1290 \text{ E-}05 \theta^2 - 2.6469 \text{ E-}03 \theta + 9.0694 \text{ E-}01$
$b = 1.7000 \text{ E-}07 \theta^2 - 1.4200 \text{ E-}05 \theta + 2.6500 \text{ E-}04$
<b>Velocidad del aire 2 m/s</b>
$k = 1.8311 \text{ E-}04 \theta^2 - 1.6442 \text{ E-}02 \theta + 3.6958 \text{ E-}01$
$n = - 1.2288 \text{ E-}03 \theta^2 + 1.1186 \text{ E-}01 \theta + 1.3245$
$a = 1.8060 \text{ E-}04 \theta^2 - 1.6372 \text{ E-}02 \theta + 1.3547$
$b = 3.2500 \text{ E-}07 \theta^2 - 2.9050 \text{ E-}05 \theta + 6.1800 \text{ E-}04$

## 6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares

### 6.2.1 Composición química de la muña fresca

Existe poca información sobre la composición química proximal de las hojas frescas y secas de *Minthostachys mollis* (muña).

Para efectos de comparación de los resultados experimentales con la información obtenida de otros autores, los datos se han expresado como porcentajes en base seca, es decir sin considerar el contenido de humedad, tal como se muestra en el cuadro 6.5.

**Cuadro 6.5**

**COMPOSICIÓN DE MUÑA – % BASE SECA**

<b>Proteínas</b>	<b>Grasas</b>	<b>Carbohidratos</b>	<b>Cenizas</b>	<b>Referencia</b>
<b>11.67</b>	<b>2.48</b>	<b>78.67</b>	<b>7.18</b>	<b>Experimental</b>
<b>3.81</b>	<b>3.33</b>	<b>78.93</b>	<b>13.93</b>	<b>Collazos, 2009</b>
<b>11.75</b>	<b>2.55</b>	<b>78.45</b>	<b>7.25</b>	<b>Liceras, 2017</b>

En el reporte de Collazos (2009) los valores obtenidos están referidos para el caso de muña con un 16 % de humedad, lo que permite suponer que no se trata de muña fresca.

Los valores experimentales obtenidos, presentados en el cuadro 2.2, son coincidentes con los datos reportados por Liceras (2017) existiendo discrepancias con el reporte de Collazos (2009) en lo referente al contenido de proteínas y cenizas.

Se puede señalar que las hojas de muña presentan un alto contenido de agua, siguiendo en orden de importancia los

carbohidratos y cenizas, las proteínas y las grasas no son un contribuyente importante.

## 6.2.2 Contenido de aceite esencial

En las plantas medicinales o aromáticas, como es el caso de la muña, los aceites esenciales están presentes en cantidades apreciables, que las dan un olor característico (Stashenko, 2009).

Se han revisado otros estudios para diversas plantas aromáticas para comparar los contenidos de aceite esencial, los cuales se muestran en el cuadro 6.6.

**Cuadro 6.6**

### CONTENIDO DE ACEITE ESENCIAL EN DIVERSAS HIERBAS AROMÁTICAS

Planta	Especie	% m/v	Referencia
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	1.94	Moreno, 2010
Hierbabuena	<i>Mentha spicata</i>	0.56	Antezana, 2017
Muña	<i>Minthostachys mollis</i>	0.21	Cano, 2008
Muña	<i>Minthostachys setosa</i>	1.06	Quispe, 2015
Orégano	<i>Origanum vulgare</i>	1.30	Albadó, 2001
Romero	<i>Rosmarinus Officinalis</i>	0.66	Valverde, 2011
Salvia	<i>Lippia alba (Mill.)</i>	0.90	Ricciardi, 2000
Tomillo	<i>Thymus vulgaris</i>	0.60	Vidaurre, 2016

El valor experimental obtenido del porcentaje de aceite extraído de *Minthostachys mollis* fue del 0.273 %, ligeramente superior al obtenido por Cano (2008), que puede explicarse a que el origen de la planta era de otra zona, y es inferior al contenido de aceite de *Minthostachys setosa*, que es otra variedad de muña. En lo que respecta a los valores de otras plantas aromáticas, el contenido de aceite esencial de *Minthostachys mollis* es inferior.

### **6.2.3 Curvas de secado**

Las curvas de secado de las hojas de *Minthostachys mollis*, obtenidas mediante la representación de los datos experimentales, presentan las mismas características que las obtenidas en otras investigaciones de secado de plantas aromáticas. Tal es el caso del culantro (Silva, 2008), la hierba luisa (Jompob, 2006 y Carteri, 2014), la menta (Kaya, 2009), el orégano (García, 2007), el perejil (Lema, 2007 y Doymaz, 2006), la salvia (Radünz, 2010 y Doymaz, 2018) y el tomillo (Loghmanieh, 2013), donde el secado abarca los tres períodos. Lo mismo ocurre con otros productos agrícolas como la albahaca (Do Reis, 2012) y la espinaca (Doymaz, 2009). Solo se diferencia con el laurel (Gunhan, 2005), que solo presenta el período decreciente, debido a un menor contenido de humedad inicial.

En estas investigaciones se señala que el incremento de la temperatura influencia positivamente, incrementando la velocidad de secado y en consecuencia se reduce el tiempo de secado, situación que también se ha verificado en el caso de las hojas de *Minthostachys mollis*.

La mayoría de estas investigaciones han estudiado la cinética del secado en capa delgada considerando como variable la temperatura, no así variando la velocidad del aire de secado. Solo se ha obtenido información del efecto de la velocidad del aire para las hojas de menta (Kaya, 2009) y las hojas de morera (Pineda, 2009), donde se señala que el incremento de la velocidad implicó un aumento de la velocidad de secado, lo que también ocurre en el caso de las hojas de *Minthostachys mollis*.

#### **6.2.4 Modelado de las curvas de secado**

El modelado de las curvas de secado se ha realizado utilizando modelos semi-empíricos y empíricos, comunes a otras investigaciones del secado convectivo de hierbas aromáticas tales como el caso de albahaca (Do Reis, 2012), culantro (Silva, 2008), espinaca (Doymaz, 2009), hierba luisa (Jompob, 2006 y Carteri, 2014), laurel (Gunhan, 2005), menta (Kaya, 2009), orégano (García, 2007), perejil (Lema, 2007 y Doymaz, 2006),

salvia (Radünz, 2010 y Doymaz, 2018) y tomillo (Loghmanieh, 2013).

Los valores obtenidos para la difusividad efectiva  $D_w$  en las hojas de *Minthostachys mollis* están dentro del rango de 2.19 E-9 a 3.08 E-9 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 1 m/s y de 2.62 E-9 a 3.68 E-9 m<sup>2</sup>/s, que son valores típicos para este tipo de productos, y nos señalan que hay una dependencia directa entre la difusividad y la temperatura. En el cuadro 6.7 se muestran valores de difusividad efectiva para diversas hierbas

**Cuadro 6.7**  
**DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN DIVERSAS HIERBAS**  
**AROMÁTICAS**

HOJA	CONDICIONES		$D_w \cdot 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$	REFERENCIA
	$V_{\text{aire}}, \text{ m/s}$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$		
ALBAHACA	---	50 - 80	0.0091 - 0.0292	Dos Reis, 2012
CULANTRO	1.5	50 - 80	0.00035 - 0.0023	Silva, 2008
ESPINACA	1.2	50 - 80	0.659 - 1.927	Doymaz, 2009
HIERBA LUISA	---	30 - 60	0.0039 - 0.0044	Martinazzo, 2007
MENTA	0.2-0.6	35 - 55	1.975 - 6.172	Kaya, 2008
PEREJIL	1.1	50 - 70	0.009 - 2.337	Doymaz, 2006
SALVIA	0.5-1.0	40 - 60	0.0032 - 0.0194	Galindo, 2016
SALVIA	2.0	45 - 65	1.620 - 5.73	Doymaz, 2018
TOMILLO	1.0	30 - 70	0.0037 - 0.0012	Da Rocha, 2012

Los valores obtenidos son comparables con los valores presentados para la menta (Kaya, 2008) y para la salvia (Doymaz, 2018) aun cuando los rangos de temperatura y de

velocidad del aire utilizados en dichas investigaciones no son los mismos.

Los valores obtenidos para la energía de activación en las hojas de *Minthostachys mollis* fueron de 14.70 kJ/mol para una velocidad de aire de 1 m/s y de 14.07 kJ/mol para una velocidad de 2 m/s, valores inferiores a los obtenidos para otras hierbas aromáticas, tal como se muestra en el cuadro 6.8.

**Cuadro 6.8**

**ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN DIVERSAS HIERBAS AROMÁTICAS**

HOJA	CONDICIONES		E <sub>a</sub> , kJ/mol	REFERENCIA
	V <sub>aire</sub> , m/s	T, °C		
CULANTRO	1.5	50 - 80	26.79	Silva, 2008
ESPINACA	1.2	50 - 80	34.35	Doymaz, 2009
HIERBA LUISA	---	30 - 60	63.47	Martinazzo, 2007
MENTA	0.2 - 0.6	35 - 55	66.8-72	Kaya, 2008
PEREJIL	1.1	50 - 70	43.92	Doymaz, 2006
PEREJIL	1.0	35 - 65	149.00	Lema, 2007
SALVIA	0.5 - 1.0	40 - 60	45.4-69.8	Galindo, 2016
SALVIA	2.0	45 - 65	52.52	Doymaz, 2018
TOMILLO	1.0	30 - 70	77.16	Da Rocha, 2012

En trabajos de investigación del secado convectivo de hierbas aromáticas se han utilizado modelos de predicción del secado como Newton, Page; Page modificado I, Page modificado II,

Henderson & Pabis, Henderson & Pabis modificado, Midilli, Dos términos, Exponencial de dos términos, Thompson, Wang \$ Singh y de Aproximación a la difusión; y se han evaluado para obtener el modelo que se ajusta a los datos experimentales.

En el caso de las hojas de *Minthostachys mollis* se ha encontrado que el modelo de Midilli era el que mejor se ajustaba a los datos experimentales, resultado coincidente con muchos trabajos de investigación del secado convectivo de hierbas aromáticas, tal como se muestra en el cuadro 6.9.

**Cuadro 6.9**

**MODELOS DE PREDICCIÓN OBTENIDOS EN DIVERSAS  
HIERBAS AROMÁTICAS**

HOJA	CONDICIONES		Modelo	REFERENCIA
	V <sub>aire</sub> , m/s	T, °C		
ALBAHACA	---	50 - 80	Midilli	Dos Reis, 2012
CULANTRO	1.5	50 - 80	Midilli	Silva, 2008
ESPINACA	1.2	50 - 80	Logarítmico	Doymaz, 2009
HIERBA LUISA	---	30 - 60	Midilli	Martinazzo, 2007
MENTA	0.2 - 0.6	35 - 55	Midilli	Kaya, 2008
OREGANO	---	60	Midilli	García, 2007
PEREJIL	1.1	50 - 70	Midilli	Doymaz, 2006
PEREJIL	1.0	35 - 65	Midilli	Lema, 2007
SALVIA	0.5 - 1.0	40 - 60	Page	Galindo, 2016
SALVIA	2.0	45 - 65	Midilli	Doymaz, 2018
TOMILLO	1.0	30 - 70	Midilli	Da Rocha, 2012

## VII. CONCLUSIONES

- a) El modelado de la cinética del secado de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) se ha realizado utilizando doce modelos y la evaluación de los resultados señala que el modelo de Midilli representa adecuadamente la variación del contenido de humedad con el tiempo de secado, para las condiciones de las pruebas experimentales.
- b) El incremento de la temperatura de secado, entre valores de 40°C, 50°C y 60°C, influyen de manera significativa la velocidad de secado de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) reduciendo el tiempo de secado requerido para alcanzar la humedad de equilibrio.
- c) El incremento de la velocidad del aire entre valores de 1 m/s y 2 m/s, influyen de manera significativa la velocidad de secado de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) reduciendo el tiempo de secado requerido para alcanzar la humedad de equilibrio.
- d) Se ha determinado que la difusividad efectiva de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) tiene valores de 2.41 E-09 a 2.93 E-09 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 1 m/s y de 2.75 E-09 a 3.38 E-09 m<sup>2</sup>/s para una velocidad del aire de 2 m/s.

- e) La difusividad efectiva sigue el modelo de Arrhenius y, dentro del rango de 40°C - 60°C, la energía de activación, era de 14.70 kJ/mol para una velocidad de 1 m/s y de 14.07 kJ/mol para una velocidad de 2 m/s.
- f) El secado de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) afecta el contenido de aceite esencial, reduciendo el rendimiento de extracción en un 36 % respecto al contenido de aceite de las hojas frescas.

## VIII RECOMENDACIONES

- a) Estudiar el impacto de la humedad absoluta del aire en el secado de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña).
  
- b) Estudiar el efecto del secado sobre la calidad del aceite esencial de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña) para determinar la máxima temperatura de secado permisible que no altere los principios activos de la planta.

## IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBADO, E. SAEZ, G y GRABIEL, S. (2001). Composición química y actividad antibacteriana del aceite esencial del *Origanum vulgare* (Orégano). *Revista Médica Herediana*. Vol. 12 N° 1: 16-19.
2. AGBOSSOU, K; NAPO, K. y CHAKRAVERTY, S. (2016). Mathematical Modelling and Solar Tunnel Drying Characteristics of Yellow Maize. *American Journal of Food Science and Technology*. Vol. 4 N°4: 115-124.
3. ANGELES, C. (2016). *Diseño de secadores*. Universidad Nacional del Callao.
4. ANTEZANA, B. (2017). "Obtención de aceite esencial e hidrolato de hierbabuena (*Mentha spicata*) mediante el proceso de destilación por arrastre con vapor". Tesis. Universidad Mayor de San Andrés - Bolivia.
5. ASSOCIATION OF THE OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. (1992). *Official Methods of Analysis*. Arlington-Virginia. Sidney Williams Editors. Décimo quinta edición.
6. BARROZO, D. SATORI, J. & FREIRE, J. (2004). A study of the statistical discrimination of the drying kinetics equations. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers Part C: Food and bioproducts processing*. Vol 82 N°C3: 219 – 225.

7. CABIESES, F. (1993). *Apuntes de medicina tradicional*. Lima. Editorial A&B S.A. Segunda edición.
8. CANO, C.; BONILLA, P. y NEIRA, E. (2014). Estudio fito-químico del aceite esencial de *Minthostachys mollis* (muña). *Universo Farmacéutico*. Vol. 1 N°3: 10 – 17.
9. CANO, C.; BONILLA, P.; ROQUE, M. y RUIZ, J. (2008). Actividad antimicótica in vitro y metabolitos del aceite esencial de las hojas de *Minthostachys mollis* (muña). *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*. 25 (3): 299.
10. CARTERI L, P.; DE CASTRO MELO, E. y PEREIRA DA ROCHA, R. (2014). Mathematical modeling of the drying kinetics of lemon grass (*Cymbopogon citratus Stapf*). IDESIA. *Revista de Agricultura en Zonas Áridas*. Vol. 32 N° 4: 43 – 56.
11. COLLAZOS, C. et al. (1996). *Composición de alimentos peruanos*. Lima. Ministerio de Salud – Centro Nacional de Alimentación y Nutrición. Séptima Edición.
12. CORREA, P.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. (2007). Modelagem matemática para a descrição do proceso de secagem de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*). *Engenharia Agrícola Jaboticabal*. Vol. 27 N° 2: 501 – 510.
13. CORREA, P. Jr. y CORREA, P. (1999). Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 3 N° 3: 349 – 653.

14. COULSON, J. y RICHARDSON, J. (1987). *Ingeniería Química – Operaciones básicas*. Vol. 2 Barcelona. Editorial Reverté.
15. CRANK, J. (2004). *The mathematics of diffusion*. New York. Oxford University Press. Segunda Edición. 2004.
16. CHEFTEL, J. (1992). *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de alimentos*. Zaragoza. Editorial Acribia S.A. Cuarta edición.
17. DA FONSECA BARBOSA et al. (2007). Evaluation of mathematical models for prediction of thin layer drying of brazilians lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (MILL) N. E. Brown). *Revista brasileira de Produtos Agroindustriais*. Vol. 9 N° 1: 73 – 82.
18. DA ROCHA, R. et al. (2012). Cinética de secado del tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 16 N° 6: 675 – 683.
19. DATTATREYA M.; GOYAL, R.; SINGH, K. y MANOJ KUMAR GUPTA. (2014). Thin layer convective drying of mint leaves. *Journal of Medicinal Plants*. N° 5: 164-170.
20. DOS REIS, R., DEVILLA, I., ASCHERI, D., SERVULO, A. & SOUZA, A. (2012). Cinética de secagem de folhas de manjeriçao (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 6 N°12: 1346 - 1352.
21. DOULIA D., TZIA, K, & GEKAS, V. (2000). A knowledge base for the apparent mass diffusion coefficient (DEFF) of foods. *International Journal of Food Properties*. Vol. 3 N°1: 1 – 14.

22. DOYMAZ, I., TUGRUL, N. & PALA, M. (2006). Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*. N°77: 559 -. 565.
23. DOYMAZ, I. Thin layer drying of spinach leaves in a convective dryer. (2009). *Journal of Food Process Engineering*. N°32: 112 – 125.
24. DOYMAZ, I. & KARASU, S. (2018). Effect of air temperature on drying kinetics, colour changes and total phenolic content of sage leaves (*Salvia officinalis*). *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*. Vol 10 N°3: 269 – 276.
25. EGAN, H. - KIRK, R. - SAWYER, R. (1991). *Pearson's Chemical Analysis of foods*. Edimburgo. Longman Group Ltd. Novena edición.
26. ERBAY, Z, & ICIER, F. (2010). A review of thin layer drying of foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol 50 N°5: 441 - 464.
27. ERTEKIN, C. & FIRAT, Z. (2015). A comprehensive review of thin layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food. Science and Nutrition*.
28. FAGUNDES, N.; CARDOSO, H.; LOPES,J.; SOUZA, R. & MATEUS, C. S (2017). Cinética de secagem de folhas de *Cymbopogon citratus*. *ENGEVISTA*. Vol. 19 N°2: 328 – 338.

29. FERREIRA, S. y COSTA, A. (2009). Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *Información Tecnológica*. Vol. 20 N° 2: 89 – 104.
30. GALINDO, C. (2016). Secado de hojas de salvia (*Salvia officinalis*) y su influencia en el color y propiedades. Tesis de grado. Andahuaylas - Apurímac. Universidad Nacional José Marías Arguedas.
31. GARCÍA, S.; SCHMALKO, M. y TANZARIELLO, A. (2007). Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en Misiones. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. Vol. 36 N° 01: 115 - 129.
32. GEANKOPLIS, Ch. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México. Editorial C.E.C.S.A. Tercera edición.
33. GIRALDO, A. et al. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cuapacu (*Theobroma grandiflorum*). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 30: 179 – 182.
34. GUNHAN, T; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E. & HEPBASILI, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*. N°46: 1667 – 1679.
35. HINES, A. y MADDOX, R. (1985). *Mass Transfer: Fundamentals and Application*. New Jersey. Prentice Hall. Tercera edición.

36. INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. (2011). Boletín Semanal Semana Epidemiológica 20. Año 8 N°20: 1 - 6. Disponible en: [www.ins.gob.pe/insvirtual/images/boletin/pdf](http://www.ins.gob.pe/insvirtual/images/boletin/pdf)
37. JOMPOB WEWSAK, SIRINUCH CHINDARUKSA & CHANTANA PUNLEK. (2006). A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. *Thammasat International Journal of Science Technology*. Vol. 1 N°1: 14 - 20.
38. KARATHANOS, V., VILLALOBOS, G, & SARAVACOS, G. (1990). Comparison of two methods of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science*. Vol. 55 N° 1: 218 – 224.
39. KAYA, A. & AYDIN, O. (2009). An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*. N°50: 118 – 124.
40. KUCUK, H., MIDILLI, A., KILIC, A. & DINCER, I. (2014). A review on thin layer drying - Curve equations. *Drying technology: An international Journal*. Vol. 32 N°7: 757 – 773.
41. LEE, HYO-JAI; LEE, SEUNG-KEE; KIM, HOON; KIM, WOONG Y HAN, JAE-WOONG. (2016). Thin-layer Drying Characteristics of Rapeseed. *Journal of Biosystems Engineering*. Vol. 41 N° 3: 232-239.
42. LEMA. A., PONTIN, M., SANMARTINO, A & MARTINELLO, M. (2007). Características del proceso de secado en capa delgada

- del perejil. *Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 11 N°10.
43. LICERAS Z. y ALZAMORA, V. (2017). Bio - accesibilidad del calcio de la muña. *Nutrición, Salud y Bienestar*. N° 43: 2 - 9.
44. LOGHMANIEH, I. & BAKHODA, H. (2013). Dehydration characteristics and mathematical modelling of thyme leaves using microwave process. *Global Journal of Science Frontier Research, Physics and Space Research*. Vol, 13 N° 8: 14 – 21.
45. MARTINAZZO, A.; CORREA, P.; RESENDE, O. & MELO, E. (2007). Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 11 N°3: 301 – 306.
46. MIDILLI, A., KUCUK, H. & YAPAR, Z. (2002). A new model for singles layer drying. *Drying technology: An international Journal*. Vol. 20 N°7: 1503 – 1513.
47. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO. (2018). Plantas Medicinales. Ubicado en: <http://www.minagri.gob.pe/portal/59-sector-agrario/plantas-medicinales>
48. MONTES, E.; TORRES, R.; ANDRADE, R. et al. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*). *Revista Ingeniería e Investigación*. Vol. 28 N° 2: 45 – 52.
49. MORENO, J; LÓPEZ, G, y SICHE, R. (2010). Modelación y optimización del proceso de extracción de aceite esencial de

- eucalipto (*Eucalyptus globulus*). *Scientia Agropecuaria*. VOI 1. N°2: 157-254.
50. MOURAD AYADA, SALAH BEN MABROUK, IMED ZOUARI, AHMED BELLAGI. (2013). Kinetic study of the convective drying of spearmint. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. N°13: 1 – 7.
  51. MUHAMMAD ARSHADUL HOQUE. (2008). Drying of selected herbal and medicinal plant. Tesis de maestría. Bangladesh Agricultural University. Mymensingh.
  52. MULET, A. et al. Mecanismo y cinética del secado de zanahorias con aire caliente. (1983). *Revista Agroquímica y Tecnología Alimentaria*. Vol. 23 N°3: 369 – 377.
  53. MÜLLER, J. (2007). Convective drying of medicinal, aromatic and spice plants: A review. *Stewart Postharvest Review*. Vol. 4 N°2: 1 – 6.
  54. OCAMPO, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía*. Vol. N°5: 119 – 128.
  55. PINEDA, M.; CHACON, A. & CORDERO, G. (2009). Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*). *Agronomía Mesoamericana*. VOL. 20 N°2: 275 – 283.
  56. QUISPE, J. (2015). Caracterización físico química del aceite esencial de la muña (*Mythostachys setosa*) y su estudio

antibacteriano. Tesis Universidad Nacional de Trujillo.

Disponible : <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3592>

57. RADÜNZ, L., MOSSI, A., ZAKRZEWSKI, C., DO AMARAL, A. & GRASSMANN, L. (2010). Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 14 N°9: 979 - 986.
58. ROJAS, A. (2007). Estudio de la cinética de transferencia de materia durante el secado convectivo del pimiento rojo (*Capsicum annuum*): Evaluación de la influencia de la temperatura sobre la calidad del producto terminado. Tesis de licenciado. La Serena – Chile. Universidad de la Serena.
59. SAHAR M. KAMEL, HALA E. THABET y ELHAM A. ALGADIZ. (2013). Influence of drying process on the functional properties of some plants. *Chemical and Materials Research*. Vol. 13 N°7: 1 – 8.
60. SILVA, A.; ALMEDA, E.; SILVA, F. & GOMES, J.(2008). Drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum*) leaf and stem. *CYTA – Journal of Food*. Vol. 6 N°1: 13 – 19.
61. STASHENKO, E. Aceites Esenciales. (2009). Primera edición. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga – Colombia. Disponible en: <http://cenivam.uis.edu.co/cenivam/>
62. TREYBAL, R. E. (2000). *Operaciones con Transferencia de Masa*. New York. Mc Graw-Hill Book Interamericana. 2da edición.

63. VAN ARSDEL, W. (1973). *Food Dehydration*. Connecticut. The Avi Publishing Company Inc. Segunda edición.
64. VEGA, A.; TELLO, C. y LEMUS, R. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la *Gracilaria* chilena (*Gracilaria chilensis*). *Ingeniare – Revista Chilena de Ingeniería*. Vol. 15 N°1: 55 - 64.
65. VIDAURRE, J. y TELLO, F. (2016). Extracción, caracterización y evaluación del efecto antimicrobiano a diferentes concentraciones del aceite esencial de tomillo (*Thymus vulgaris*) en carne de pollo deshuesada almacenada en refrigeración. Tesis. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
66. YAPUCHURA, R. (2010). Estudio de los componentes antioxidantes de las hojas de muña (*Minthostachys mollis*) e inca muña (*Clinopodium bolivianum* (benth.) Kuntze). Tesis de maestría. Lima. Universidad Nacional Agraria La Molina.

# **ANEXOS**

**Anexo 1**

**Matriz de consistencia**

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

### “CINÉTICA DEL SECADO CONVECTIVO DE HOJAS DE *Minthostachys mollis* (Muña)”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODO
¿Cuál es el modelo que explica la cinética del secado observada durante el secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> )?	Identificar el modelo que explica la cinética del secado observado durante el secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> ).	Si las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> ) son sometidas a un secado convectivo en condiciones constantes, a diferentes temperaturas y velocidades de flujo de trabajo, la cinética del secado sigue un comportamiento que corresponde a un modelo determinado.	X = Velocidad de secado	Variación de contenido de humedad	Peso sólido húmedo	Método gravimétrico
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODO
¿Cuál es el efecto de la temperatura del aire caliente sobre la cinética del secado observado durante el secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> )?	Determinar el efecto de la temperatura del aire caliente en el secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> ).	El incremento de la temperatura produce un aumento de la velocidad del secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> ).	X <sub>1</sub> = Temperatura del aire caliente	Rango de temperaturas	°C	Observación experimental
¿Cuál es el efecto de la velocidad del aire caliente sobre la cinética del secado observado durante el secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> )?	Determinar el efecto de la velocidad del aire caliente en el secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> ).	El incremento del flujo de aire en la cámara de secado produce un aumento de la velocidad del secado convectivo de las hojas de muña ( <i>Minthostachys mollis</i> ).	X <sub>2</sub> = Velocidad del aire	Rango de velocidades	m/s	Observación experimental

## **Anexo 2**

### **Clasificación taxonómica de la muña**



"Año del Buen Servicio al Ciudadano"

**CONSTANCIA N°170-USM-2018**

EL JEFE DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (planta completa) recibida del Ing. Fabio Manuel RANGEL MORALES, de la Universidad Nacional del Callao, ha sido estudiada y clasificada como: ***Minthostachys mollis***, var. ***mollis*** Griseb. y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1988).

**DIVISION: MAGNOLIOPHYTA**

**CLASE: MAGNOLIOPSIDA**

**SUBCLASE: ASTERIDAE**

**ORDEN: LAMIALES**

**FAMILIA: LAMIACEAE**

**GENERO: *Minthostachys***

**ESPECIE: *Minthostachys mollis*, var. *mollis* Griseb.**

Nombre vulgar : "muña"

Determinado por: Dra. Joaquina Albán Castillo.

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para fines de estudios.

Lima, 11 de mayo de 2018



  
**Mg. ASUNCIÓN A. CANO ECHEVARRIA**  
 JEFE DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

ACE/ddb

### **Anexo 3**

#### **Datos experimentales de secado**

$T = 40^{\circ}\text{C}$  y  $V = 1 \text{ m/s}$

$W_{\text{bandeja}} = 72.120 \text{ g}$

$W_{\text{SS}} = 10.758 \text{ g}$

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	$X$
0	125.91	53.79	4.0000
5	124.71	52.59	3.8885
10	123.14	51.02	3.7425
15	121.87	49.75	3.6245
20	120.54	48.42	3.5008
25	119.67	47.55	3.4200
30	118.18	46.06	3.2815
35	117.08	44.96	3.1792
40	116.01	43.89	3.0798
45	114.80	42.68	2.9673
50	113.88	41.76	2.8818
55	113.03	40.91	2.8028
60	112.10	39.98	2.7163
70	110.42	38.30	2.5601
80	108.55	36.43	2.3863
90	106.84	34.72	2.2274
100	105.32	33.20	2.0861
110	103.71	31.59	1.9364
120	102.29	30.17	1.8045
130	101.03	28.91	1.6873
140	99.78	27.66	1.5711
150	98.64	26.52	1.4651
160	97.59	25.47	1.3675
170	96.64	24.52	1.2792
180	95.77	23.65	1.1984
190	94.97	22.85	1.1240
200	94.24	22.12	1.0561

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	$X$
210	93.62	21.50	0.9985
220	92.98	20.86	0.9390
230	92.44	20.32	0.8888
240	91.96	19.84	0.8442
250	91.53	19.41	0.8042
260	91.16	19.04	0.7698
270	90.84	18.72	0.7401
280	90.54	18.42	0.7122
290	90.29	18.17	0.6890
300	90.10	17.98	0.6713
320	89.74	17.62	0.6379
340	89.50	17.38	0.6155
360	89.36	17.24	0.6025
380	89.23	17.11	0.5904
400	89.10	16.98	0.5784
420	89.01	16.89	0.5700
440	88.92	16.80	0.5616
460	88.87	16.75	0.5570
480	88.83	16.71	0.5533

T = 50°C y V = 1 m/s

$W_{\text{bandeja}} = 72.120 \text{ g}$

$W_{\text{SS}} = 11.442 \text{ g}$

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	X
0	124.87	52.75	4.0000
5	123.44	51.32	3.8645
10	121.99	49.87	3.7270
15	120.54	48.42	3.5896
20	119.09	46.97	3.4521
25	117.64	45.52	3.3147
30	116.19	44.07	3.1773
35	114.74	42.62	3.0398
40	113.29	41.17	2.9024
45	111.84	39.72	2.7649
50	110.38	38.26	2.6265
55	108.93	36.81	2.4891
60	107.98	35.86	2.3991
70	105.96	33.84	2.2076
80	103.71	31.59	1.9943
90	101.60	29.48	1.7943
100	99.70	27.58	1.6142
110	98.19	26.07	1.4711
120	96.52	24.40	1.3128
130	94.90	22.78	1.1592
140	93.69	21.57	1.0445
150	92.53	20.41	0.9346
160	91.53	19.41	0.8398
170	90.61	18.49	0.7526
180	89.82	17.70	0.6777
190	89.13	17.01	0.6123
200	88.51	16.39	0.5536

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	X
210	87.99	15.87	0.5043
220	87.54	15.42	0.4616
230	87.15	15.03	0.4246
240	86.88	14.76	0.3991
250	86.56	14.44	0.3687
260	86.34	14.22	0.3479
270	86.16	14.04	0.3308
280	86.02	13.90	0.3175
290	85.89	13.77	0.3052
300	85.79	13.67	0.2957
320	85.69	13.57	0.2863
340	85.61	13.49	0.2787
360	85.52	13.40	0.2701
380	85.43	13.31	0.2616
400	85.36	13.24	0.2550

**$T = 60^{\circ}\text{C}$  y  $V = 1 \text{ m/s}$**

**$W_{\text{bandeja}} = 72.120 \text{ g}$**

**$W_{\text{ss}} = 10.550 \text{ g}$**

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	$X$
0	129.33	57.21	4.0000
5	126.09	53.97	3.7168
10	122.99	50.87	3.4459
15	119.88	47.76	3.1741
20	116.83	44.71	2.9075
25	113.99	41.87	2.6593
30	111.50	39.38	2.4417
35	109.42	37.30	2.2599
40	107.13	35.01	2.0598
45	104.92	32.80	1.8666
50	102.84	30.72	1.6848
55	100.95	28.83	1.5197
60	99.18	27.06	1.3650
70	96.11	23.99	1.0967
80	93.58	21.46	0.8755
90	91.80	19.68	0.7200
100	90.67	18.55	0.6212
110	89.68	17.56	0.5347
120	88.97	16.85	0.4726
130	88.49	16.37	0.4307
140	88.26	16.14	0.4106
150	87.88	15.76	0.3774
160	87.82	15.70	0.3721
170	87.52	15.40	0.3459
180	87.43	15.31	0.3381
190	87.22	15.10	0.3197
200	87.06	14.94	0.3057

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	$X$
210	86.92	14.8	0.2935
220	86.8	14.68	0.2830
230	86.71	14.59	0.2751
240	86.63	14.51	0.2681
250	86.54	14.42	0.2603
260	86.46	14.34	0.2533
270	86.41	14.29	0.2489
280	86.38	14.26	0.2463

$T = 40^{\circ}\text{C}$  y  $V = 2 \text{ m/s}$

$W_{\text{bandeja}} = 72.120 \text{ g}$

$W_{\text{SS}} = 11.242 \text{ g}$

$\theta$ , min	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	X
0	128.33	56.21	4.0000
5	126.92	54.80	3.8746
10	124.65	52.53	3.6727
15	122.92	50.80	3.5188
20	121.28	49.16	3.3729
25	119.67	47.55	3.2297
30	117.99	45.87	3.0802
35	116.23	44.11	2.9237
40	114.77	42.65	2.7938
45	113.13	41.01	2.6479
50	111.70	39.58	2.5207
55	109.91	37.79	2.3615
60	108.72	36.60	2.2556
70	106.78	34.66	2.0831
80	104.43	32.31	1.8740
90	102.36	30.24	1.6899
100	100.51	28.39	1.5254
110	98.73	26.61	1.3670
120	97.27	25.15	1.2371
130	95.80	23.68	1.1064
140	94.53	22.41	0.9934
150	93.46	21.34	0.8982
160	92.46	20.34	0.8093
170	91.67	19.55	0.7390
180	90.93	18.81	0.6732
190	90.25	18.13	0.6127
200	89.72	17.60	0.5656

$\theta$ , min	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	X
210	89.23	17.11	0.5220
220	88.87	16.75	0.4899
230	88.56	16.44	0.4624
240	88.26	16.14	0.4357
250	88.05	15.93	0.4170
260	87.88	15.76	0.4019
270	87.76	15.64	0.3912
280	87.65	15.53	0.3814
290	87.55	15.43	0.3725
300	87.48	15.36	0.3663
320	87.40	15.28	0.3592
340	87.32	15.20	0.3521

**$T = 50^{\circ}\text{C}$  y  $V = 2 \text{ m/s}$**

**$W_{\text{bandeja}} = 72.120 \text{ g}$**

**$W_{\text{ss}} = 10.962 \text{ g}$**

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	$X$
0	126.93	54.81	4.0000
5	125.05	52.93	3.8285
10	122.83	50.71	3.6260
15	120.85	48.73	3.4454
20	119.02	46.90	3.2784
25	117.12	45.00	3.1051
30	115.21	43.09	2.9309
35	113.63	41.51	2.7867
40	111.79	39.67	2.6189
45	109.98	37.86	2.4537
50	108.22	36.10	2.2932
55	106.35	34.23	2.1226
60	105.36	33.24	2.0323
70	102.84	30.72	1.8024
80	100.47	28.35	1.5862
90	98.34	26.22	1.3919
100	96.50	24.38	1.2240
110	94.70	22.58	1.0598
120	93.15	21.03	0.9184
130	91.90	19.78	0.8044
140	90.67	18.55	0.6922
150	89.60	17.48	0.5946
160	88.71	16.59	0.5134
170	87.99	15.87	0.4477
180	87.45	15.33	0.3985
190	86.85	14.73	0.3437
200	86.48	14.36	0.3100

$\theta, \text{ min}$	$W_{\text{TOTAL}}$	$W_{\text{SH}}$	$X$
210	86.13	14.01	0.2781
220	85.85	13.73	0.2525
230	85.64	13.52	0.2334
240	85.5	13.38	0.2206
250	85.42	13.3	0.2133
260	85.36	13.24	0.2078
270	85.28	13.16	0.2005
280	85.25	13.13	0.1978
290	85.21	13.09	0.1941
300	85.18	13.06	0.1914

**T = 60°C y V = 2 m/s**

**W<sub>bandeja</sub> = 72.120 g**

**W<sub>SS</sub> = 10.916 g**

<b>θ, min</b>	<b>W<sub>TOTAL</sub></b>	<b>W<sub>SH</sub></b>	<b>X</b>
0	126.70	54.58	4.0000
5	120.81	48.69	3.4604
10	114.95	42.83	2.9236
15	109.85	37.73	2.4564
20	104.61	32.49	1.9764
25	100.19	28.07	1.5715
30	97.19	25.07	1.2966
35	95.36	23.24	1.1290
40	93.80	21.68	0.9861
45	92.70	20.58	0.8853
50	91.72	19.60	0.7955
55	90.72	18.60	0.7039
60	89.94	17.82	0.6325
70	88.77	16.65	0.5253
80	87.96	15.84	0.4511
90	87.39	15.27	0.3989
100	86.89	14.77	0.3531
110	86.51	14.39	0.3182
120	86.04	13.92	0.2752
130	85.77	13.65	0.2505
140	85.48	13.36	0.2239
150	85.44	13.32	0.2202
160	85.22	13.10	0.2001
170	85.11	12.99	0.1900
180	84.95	12.83	0.1753
190	84.84	12.72	0.1653
200	84.78	12.66	0.1598

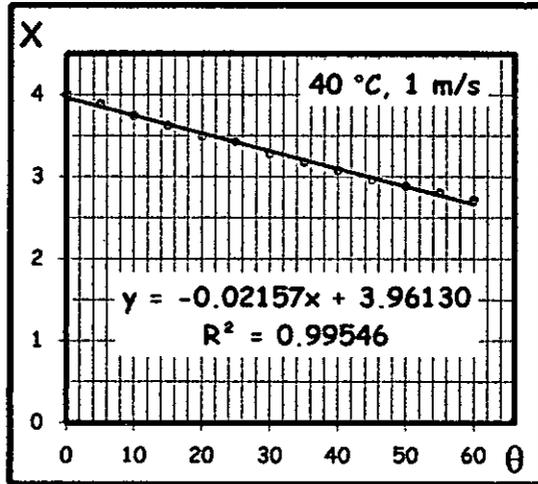
<b>θ, min</b>	<b>W<sub>TOTAL</sub></b>	<b>W<sub>SH</sub></b>	<b>X</b>
210	84.69	12.57	0.1515
220	84.63	12.51	0.1458
230	84.59	12.47	0.1424
240	84.56	12.44	0.1396
250	84.55	12.43	0.1387
260	84.54	12.42	0.1378

## **Anexo 4**

### **Velocidad de secado - Período de velocidad constante**

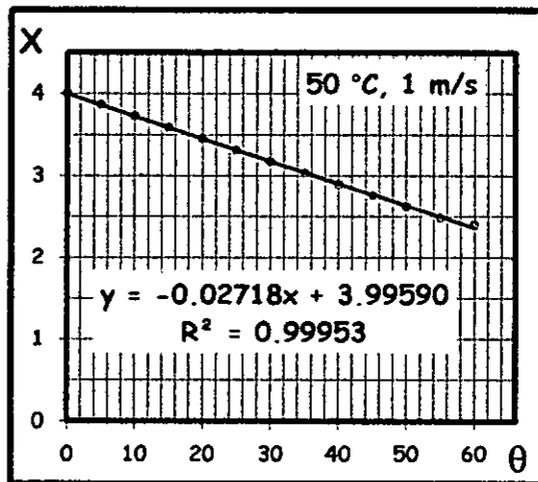
**T = 40°C y V = 1 m/s**

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8885
10	3.7425
15	3.6245
20	3.5008
25	3.4200
30	3.2815
35	3.1792
40	3.0798
45	2.9673
50	2.8818
55	2.8028
60	2.7163



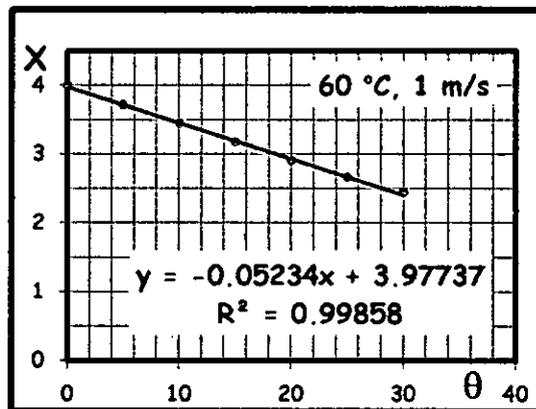
**T = 50°C y V = 1 m/s**

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8645
10	3.7270
15	3.5896
20	3.4521
25	3.3147
30	3.1773
35	3.0398
40	2.9024
45	2.7649
50	2.6265
55	2.4891
60	2.3991



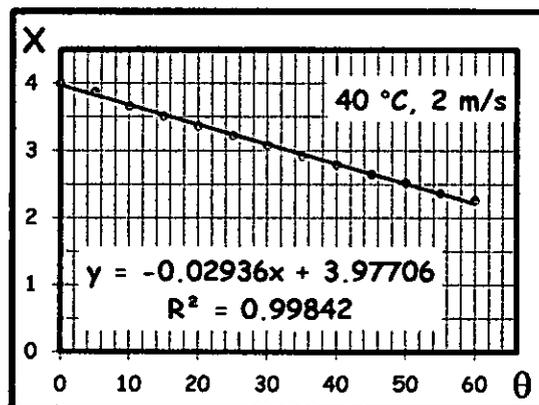
**T = 60°C y V = 1 m/s**

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.7168
10	3.4459
15	3.1741
20	2.9075
25	2.6593
30	2.4417



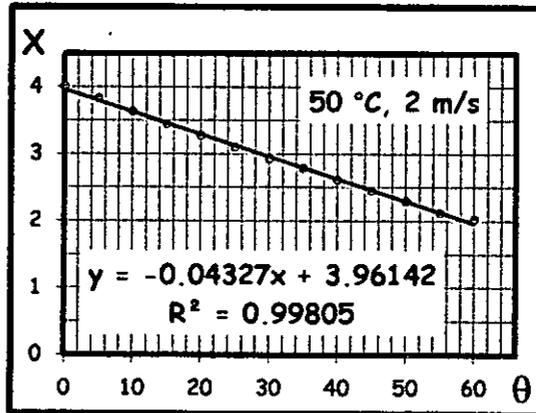
**T = 40°C y V = 2 m/s**

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8746
10	3.6727
15	3.5188
20	3.3729
25	3.2297
30	3.0802
35	2.9237
40	2.7938
45	2.6479
50	2.5207
55	2.3615
60	2.2556



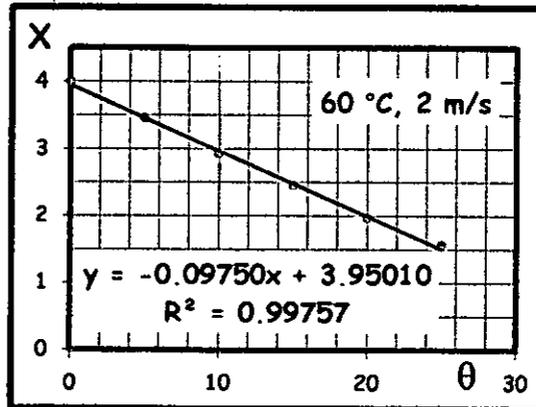
**T = 50°C y V = 2 m/s**

$\theta, \text{min}$	X
0	4.0000
5	3.8285
10	3.6260
15	3.4454
20	3.2784
25	3.1051
30	2.9309
35	2.7867
40	2.6189
45	2.4537
50	2.2932
55	2.1226
60	2.0323



**T = 60°C y V = 2 m/s**

$\theta, \text{min}$	X
0	4.0000
5	3.4604
10	2.9236
15	2.4564
20	1.9764
25	1.5715



**Anexo 5**

**Velocidad de secado - Período de velocidad decreciente**

T = 40°C y V = 1 m/s

$\theta$ , min	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
60	2.7163		
70	2.5601	2.6382	0.0156
80	2.3863	2.4732	0.0174
90	2.2274	2.3068	0.0159
100	2.0861	2.1567	0.0141
110	1.9364	2.0112	0.0150
120	1.8045	1.8705	0.0132
130	1.6873	1.7459	0.0117
140	1.5711	1.6292	0.0116
150	1.4651	1.5181	0.0106
160	1.3675	1.4163	0.0098
170	1.2792	1.3234	0.0088
180	1.1984	1.2388	0.0081
190	1.1240	1.1612	0.0074
200	1.0561	1.0901	0.0068
210	0.9985	1.0273	0.0058
220	0.9390	0.9688	0.0059

$\theta$ , min	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
230	0.8888	0.9139	0.0050
240	0.8442	0.8665	0.0045
250	0.8042	0.8242	0.0040
260	0.7698	0.7870	0.0034
270	0.7401	0.7550	0.0030
280	0.7122	0.7262	0.0028
290	0.6890	0.7006	0.0023
300	0.6713	0.6801	0.0018
320	0.6379	0.6546	0.0017
340	0.6155	0.6267	0.0011
360	0.6025	0.6090	0.0007
380	0.5904	0.5965	0.0006
400	0.5784	0.5844	0.0006
420	0.5700	0.5742	0.0004
440	0.5616	0.5658	0.0004
460	0.5570	0.5593	0.0002
480	0.5533	0.5551	0.0002

T = 50°C y V = 1 m/s

$\theta, \text{ min}$	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
60	2.3991		
70	2.2076	2.3033	0.0191
80	1.9943	2.1009	0.0213
90	1.7943	1.8943	0.0200
100	1.6142	1.7043	0.0180
110	1.4711	1.5427	0.0143
120	1.3128	1.3919	0.0158
130	1.1592	1.2360	0.0154
140	1.0445	1.1019	0.0115
150	0.9346	0.9896	0.0110
160	0.8398	0.8872	0.0095
170	0.7526	0.7962	0.0087
180	0.6777	0.7152	0.0075
190	0.6123	0.6450	0.0065
200	0.5536	0.5829	0.0059
210	0.5043	0.5289	0.0049

$\theta, \text{ min}$	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
220	0.4616	0.4829	0.0043
230	0.4246	0.4431	0.0037
240	0.3991	0.4118	0.0026
250	0.3687	0.3839	0.0030
260	0.3479	0.3583	0.0021
270	0.3308	0.3393	0.0017
280	0.3175	0.3242	0.0013
290	0.3052	0.3114	0.0012
300	0.2957	0.3005	0.0009
320	0.2863	0.2910	0.0005
340	0.2787	0.2825	0.0004
360	0.2701	0.2744	0.0004
380	0.2616	0.2659	0.0004
400	0.2550	0.2583	0.0003
420	0.2502	0.2526	0.0002

$T = 60^{\circ}\text{C}$  y  $V = 1 \text{ m/s}$

$\theta, \text{ min}$	$X$	$X_{\text{prom}}$	$-\Delta X/\Delta\theta$
30	2.4417		
35	2.2599	2.3508	0.0364
40	2.0598	2.1598	0.0400
45	1.8666	1.9632	0.0386
50	1.6848	1.7757	0.0364
55	1.5197	1.6023	0.0330
60	1.3650	1.4423	0.0309
70	1.0967	1.2308	0.0268
80	0.8755	0.9861	0.0221
90	0.7200	0.7978	0.0156
100	0.6212	0.6706	0.0099
110	0.5347	0.5780	0.0087
120	0.4726	0.5037	0.0062
130	0.4307	0.4517	0.0042
140	0.4106	0.4206	0.0020
150	0.3774	0.3940	0.0033
160	0.3721	0.3748	0.0005
170	0.3459	0.3590	0.0026
180	0.3381	0.3420	0.0008
190	0.3197	0.3289	0.0018
200	0.3057	0.3127	0.0014

$\theta, \text{ min}$	$X$	$X_{\text{prom}}$	$-\Delta X/\Delta\theta$
210	0.2935	0.2996	0.0012
220	0.2830	0.2882	0.0010
230	0.2751	0.2791	0.0008
240	0.2681	0.2716	0.0007
250	0.2603	0.2642	0.0008
260	0.2533	0.2568	0.0007
270	0.2489	0.2511	0.0004
280	0.2463	0.2476	0.0003
290	0.2428	0.2445	0.0003
300	0.2393	0.2410	0.0003

T = 40°C y V = 2 m/s

$\theta$ , min	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
60	2.2556		
70	2.0831	2.1694	0.0173
80	1.8740	1.9786	0.0209
90	1.6899	1.7820	0.0184
100	1.5254	1.6076	0.0165
110	1.3670	1.4462	0.0158
120	1.2371	1.3021	0.0130
130	1.1064	1.1718	0.0131
140	0.9934	1.0499	0.0113
150	0.8982	0.9458	0.0095
160	0.8093	0.8538	0.0089
170	0.7390	0.7742	0.0070
180	0.6732	0.7061	0.0066
190	0.6127	0.6429	0.0060
200	0.5656	0.5891	0.0047
210	0.5220	0.5438	0.0044
220	0.4899	0.5060	0.0032

$\theta$ , min	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
230	0.4624	0.4762	0.0028
240	0.4357	0.4490	0.0027
250	0.4170	0.4263	0.0019
260	0.4019	0.4094	0.0015
270	0.3912	0.3965	0.0011
280	0.3814	0.3863	0.0010
290	0.3725	0.3770	0.0009
300	0.3663	0.3694	0.0006
320	0.3592	0.3627	0.0004
340	0.3521	0.3556	0.0004
360	0.3467	0.3494	0.0003
380	0.3423	0.3445	0.0002
400	0.3405	0.3414	0.0001
420	0.3387	0.3396	0.0001

T = 50°C y V = 2 m/s

$\theta, \text{min}$	$X$	$X_{\text{prom}}$	$-\Delta X/\Delta\theta$
60	2.0323		
70	1.8024	1.9174	0.0230
80	1.5862	1.6943	0.0216
90	1.3919	1.4891	0.0194
100	1.2240	1.3080	0.0168
110	1.0598	1.1419	0.0164
120	0.9184	0.9891	0.0141
130	0.8044	0.8614	0.0114
140	0.6922	0.7483	0.0112
150	0.5946	0.6434	0.0098
160	0.5134	0.5540	0.0081
170	0.4477	0.4806	0.0066
180	0.3985	0.4231	0.0049
190	0.3437	0.3711	0.0055
200	0.3100	0.3269	0.0034
210	0.2781	0.2940	0.0032
220	0.2525	0.2653	0.0026

$\theta, \text{min}$	$X$	$X_{\text{prom}}$	$-\Delta X/\Delta\theta$
230	0.2334	0.2429	0.0019
240	0.2206	0.2270	0.0013
250	0.2133	0.2169	0.0007
260	0.2078	0.2105	0.0005
270	0.2005	0.2042	0.0007
280	0.1978	0.1991	0.0003
290	0.1941	0.1959	0.0004
300	0.1914	0.1928	0.0003
320	0.1841	0.1877	0.0004
340	0.1741	0.1791	0.0005
360	0.1668	0.1704	0.0004

T = 60°C y V = 2 m/s

$\theta$ , min	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
30	1.2966		
35	1.1290	1.2128	0.0335
40	0.9861	1.0575	0.0286
45	0.8853	0.9357	0.0202
50	0.7955	0.8404	0.0180
55	0.7039	0.7497	0.0183
60	0.6325	0.6682	0.0143
70	0.5253	0.5789	0.0107
80	0.4511	0.4882	0.0074
90	0.3989	0.4250	0.0052
100	0.3531	0.3760	0.0046
110	0.3182	0.3357	0.0035
120	0.2752	0.2967	0.0043
130	0.2505	0.2628	0.0025
140	0.2239	0.2372	0.0027
150	0.2202	0.2221	0.0004

$\theta$ , min	X	X <sub>prom</sub>	$-\Delta X/\Delta\theta$
160	0.2001	0.2102	0.0020
170	0.1900	0.1950	0.0010
180	0.1753	0.1827	0.0015
190	0.1653	0.1703	0.0010
200	0.1598	0.1625	0.0005
220	0.1458	0.1487	0.0006
230	0.1424	0.1441	0.0003
240	0.1396	0.1410	0.0003
250	0.1387	0.1392	0.0001
260	0.1378	0.1382	0.0001

## Anexo 6

### Estimación de coeficientes de difusión

$$RH = \frac{X^* - X}{X^* - X_0} = \frac{8}{\pi^2} \text{EXP} \frac{-D_w \cdot \pi^2 \cdot \theta}{4 L^2}$$

$$RH = Y = (X^* - X)/(X^* - X_0)$$

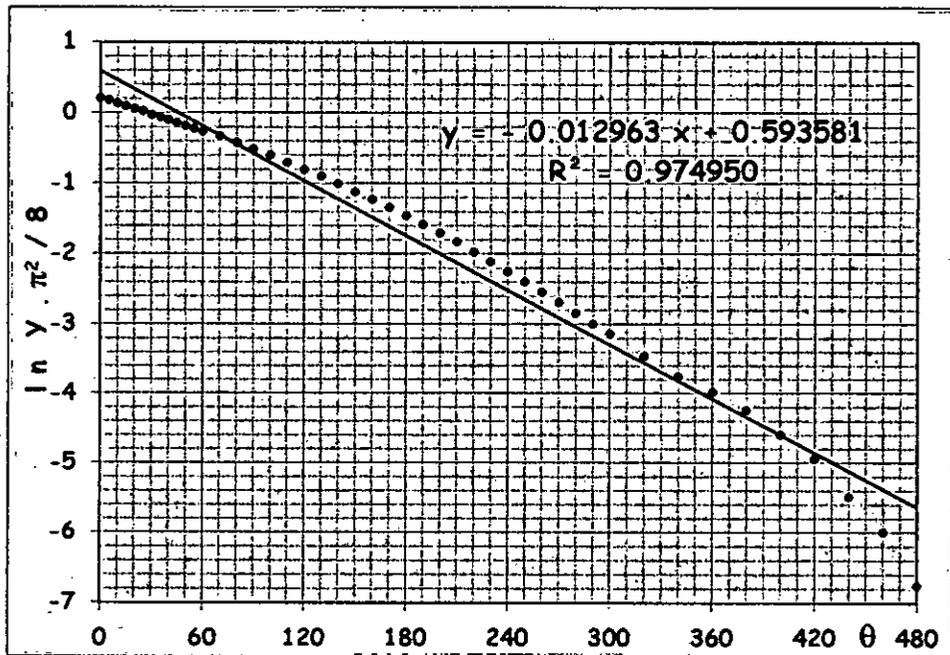
T = 40°C y V = 1 m/s

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8885
10	3.7425
15	3.6245
20	3.5008
25	3.4200
30	3.2815
35	3.1792
40	3.0798
45	2.9673
50	2.8818
55	2.8028
60	2.7163
70	2.5601
80	2.3863
90	2.2274
100	2.0861
110	1.9364
120	1.8045
130	1.6873
140	1.5711
150	1.4651
160	1.3675
170	1.2792
180	1.1984
190	1.1240
200	1.0561
210	0.9985
220	0.9390
230	0.8888
240	0.8442
250	0.8042
260	0.7698

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
1.0000	1.234E+00	0.2100
0.9677	1.194E+00	0.1772
0.9254	1.142E+00	0.1325
0.8911	1.099E+00	0.0948
0.8553	1.055E+00	0.0537
0.8319	1.026E+00	0.0259
0.7917	9.768E-01	-0.0235
0.7621	9.402E-01	-0.0617
0.7333	9.046E-01	-0.1002
0.7007	8.644E-01	-0.1457
0.6759	8.338E-01	-0.1817
0.6530	8.056E-01	-0.2162
0.6279	7.747E-01	-0.2553
0.5826	7.188E-01	-0.3302
0.5323	6.567E-01	-0.4206
0.4862	5.998E-01	-0.5111
0.4452	5.493E-01	-0.5991
0.4019	4.958E-01	-0.7016
0.3636	4.486E-01	-0.8016
0.3297	4.067E-01	-0.8997
0.2960	3.651E-01	-1.0075
0.2653	3.272E-01	-1.1170
0.2370	2.923E-01	-1.2298
0.2114	2.608E-01	-1.3441
0.1879	2.319E-01	-1.4617
0.1664	2.053E-01	-1.5835
0.1467	1.810E-01	-1.7093
0.1300	1.604E-01	-1.8302
0.1128	1.391E-01	-1.9725
0.0982	1.212E-01	-2.1106
0.0853	1.052E-01	-2.2518
0.0737	9.091E-02	-2.3978
0.0637	7.862E-02	-2.5432

$\theta, \text{min}$	X
270	0.7401
280	0.7122
290	0.6890
300	0.6713
320	0.6379
340	0.6155
360	0.6025
380	0.5904
400	0.5784
420	0.5700
440	0.5616
460	0.5570
480	0.5533

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
0.0551	6.798E-02	-2.6886
0.0470	5.801E-02	-2.8472
0.0403	4.970E-02	-3.0018
0.0352	4.338E-02	-3.1377
0.0255	3.141E-02	-3.4605
0.0190	2.344E-02	-3.7534
0.0152	1.878E-02	-3.9748
0.0117	1.446E-02	-4.2362
0.0082	1.014E-02	-4.5911
0.0058	7.150E-03	-4.9407
0.0034	4.158E-03	-5.4826
0.0020	2.496E-03	-5.9929
0.0009	1.167E-03	-6.7536



$$L = E/2 = 0.005 \text{ m}$$

$$D_w \cdot \pi^2 / 4 L^2 = 0.012963$$

$$D_w = 1.31 \text{ E-07 m}^2/\text{min} = 2.19 \text{ E-09 m}^2/\text{s}$$

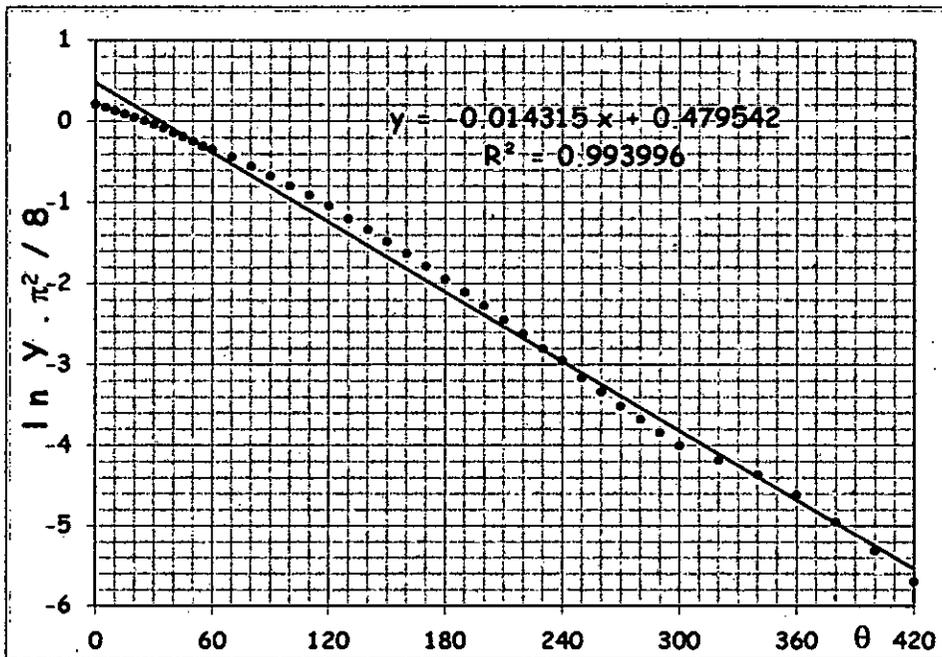
T = 50°C y V = 1 m/s

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8645
10	3.7270
15	3.5896
20	3.4521
25	3.3147
30	3.1773
35	3.0398
40	2.9024
45	2.7649
50	2.6265
55	2.4891
60	2.3991
70	2.2076
80	1.9943
90	1.7943
100	1.6142
110	1.4711
120	1.3128
130	1.1592
140	1.0445
150	0.9346
160	0.8398
170	0.7526
180	0.6777
190	0.6123
200	0.5536
210	0.5043
220	0.4616
230	0.4246
240	0.3991
250	0.3687
260	0.3479

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
1.0000	1.234E+00	0.2100
0.9640	1.189E+00	0.1733
0.9274	1.144E+00	0.1346
0.8908	1.099E+00	0.0944
0.8543	1.054E+00	0.0525
0.8177	1.009E+00	0.0088
0.7812	9.637E-01	-0.0369
0.7446	9.187E-01	-0.0848
0.7081	8.736E-01	-0.1352
0.6715	8.285E-01	-0.1882
0.6347	7.831E-01	-0.2446
0.5982	7.380E-01	-0.3039
0.5742	7.084E-01	-0.3447
0.5233	6.456E-01	-0.4376
0.4666	5.756E-01	-0.5523
0.4134	5.100E-01	-0.6734
0.3655	4.509E-01	-0.7965
0.3274	4.039E-01	-0.9065
0.2853	3.520E-01	-1.0441
0.2445	3.016E-01	-1.1986
0.2140	2.640E-01	-1.3319
0.1847	2.279E-01	-1.4788
0.1595	1.968E-01	-1.6255
0.1363	1.682E-01	-1.7826
0.1164	1.436E-01	-1.9406
0.0990	1.222E-01	-2.1024
0.0834	1.029E-01	-2.2742
0.0703	8.671E-02	-2.4452
0.0589	7.271E-02	-2.6212
0.0491	6.058E-02	-2.8037
0.0423	5.219E-02	-2.9529
0.0342	4.223E-02	-3.1645
0.0287	3.539E-02	-3.3413

$\theta, \text{ min}$	X
270	0.3308
280	0.3175
290	0.3052
300	0.2957
320	0.2863
340	0.2787
360	0.2701
380	0.2616
400	0.2550
420	0.2502

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
0.0242	2.979E-02	-3.5134
0.0206	2.544E-02	-3.6714
0.0173	2.140E-02	-3.8445
0.0148	1.829E-02	-4.0016
0.0123	1.518E-02	-4.1880
0.0103	1.269E-02	-4.3670
0.0080	9.890E-03	-4.6162
0.0057	7.091E-03	-4.9489
0.0040	4.914E-03	-5.3157
0.0027	3.359E-03	-5.6962



$$L = E/2 = 0.005 \text{ m}$$

$$D_w \cdot \pi^2/4 L^2 = 0.014315$$

$$D_w = 1.45 \text{ E-07 m}^2/\text{min} = 2.42 \text{ E-09 m}^2/\text{s}$$

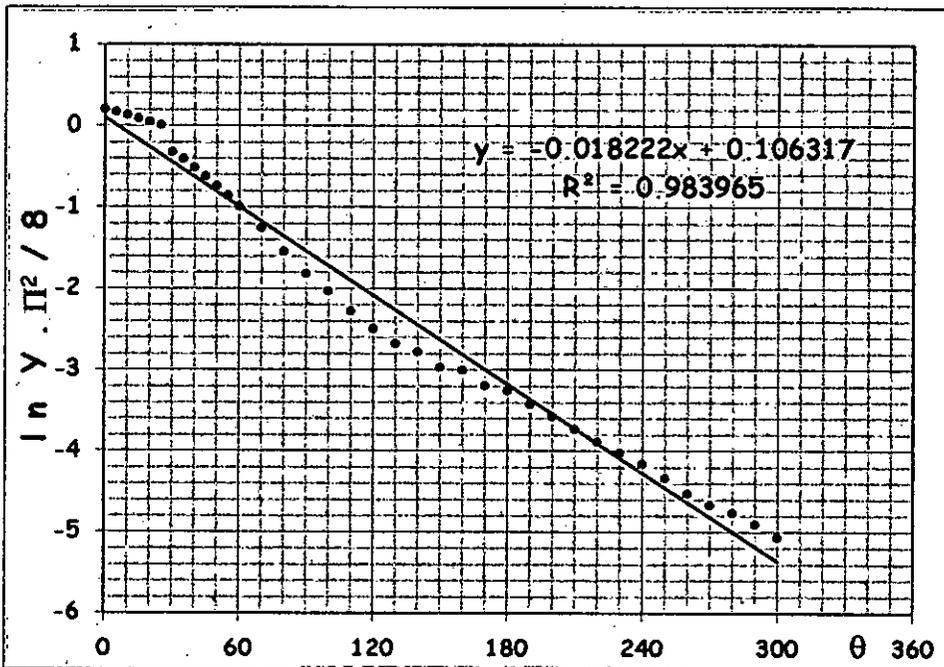
T = 60°C y V = 1 m/s

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8645
10	3.7270
15	3.5896
20	3.4521
25	3.3147
30	2.4417
35	2.2599
40	2.0598
45	1.8666
50	1.6848
55	1.5197
60	1.3650
70	1.0967
80	0.8755
90	0.7200
100	0.6212
110	0.5347
120	0.4726
130	0.4307
140	0.4106
150	0.3774
160	0.3721
170	0.3459
180	0.3381
190	0.3197
200	0.3057
210	0.2935
220	0.2830

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
1.0000	1.234E+00	0.2100
0.9641	1.189E+00	0.1735
0.9278	1.145E+00	0.1351
0.8914	1.100E+00	0.0951
0.8551	1.055E+00	0.0534
0.8187	1.010E+00	0.0100
0.5878	7.251E-01	-0.3214
0.5397	6.658E-01	-0.4068
0.4867	6.005E-01	-0.5101
0.4356	5.374E-01	-0.6210
0.3875	4.781E-01	-0.7380
0.3438	4.242E-01	-0.8576
0.3029	3.737E-01	-0.9843
0.2319	2.861E-01	-1.2513
0.1734	2.140E-01	-1.5420
0.1323	1.632E-01	-1.8129
0.1061	1.309E-01	-2.0330
0.0833	1.027E-01	-2.2759
0.0668	8.246E-02	-2.4955
0.0557	6.877E-02	-2.6771
0.0504	6.220E-02	-2.7773
0.0416	5.137E-02	-2.9688
0.0402	4.965E-02	-3.0027
0.0333	4.110E-02	-3.1918
0.0312	3.853E-02	-3.2563
0.0264	3.254E-02	-3.4253
0.0227	2.798E-02	-3.5764
0.0194	2.398E-02	-3.7304
0.0167	2.056E-02	-3.8844

$\theta$ , min	X
230	0.2751
240	0.2681
250	0.2603
260	0.2533
270	0.2489
280	0.2463
290	0.2428
300	0.2393

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
0.0146	1.799E-02	-4.0178
0.0127	1.571E-02	-4.1535
0.0107	1.314E-02	-4.3319
0.0088	1.086E-02	-4.5226
0.0076	9.435E-03	-4.6634
0.0070	8.579E-03	-4.7584
0.0060	7.438E-03	-4.9012
0.0051	6.297E-03	-5.0677



$$L = E/2 = 0.005 \text{ m}$$

$$D_w \cdot \pi^2 / 4 L^2 = 0.018222$$

$$D_w = 1.85 \text{ E-07 m}^2/\text{min} = 3.08 \text{ E-09 m}^2/\text{s}$$

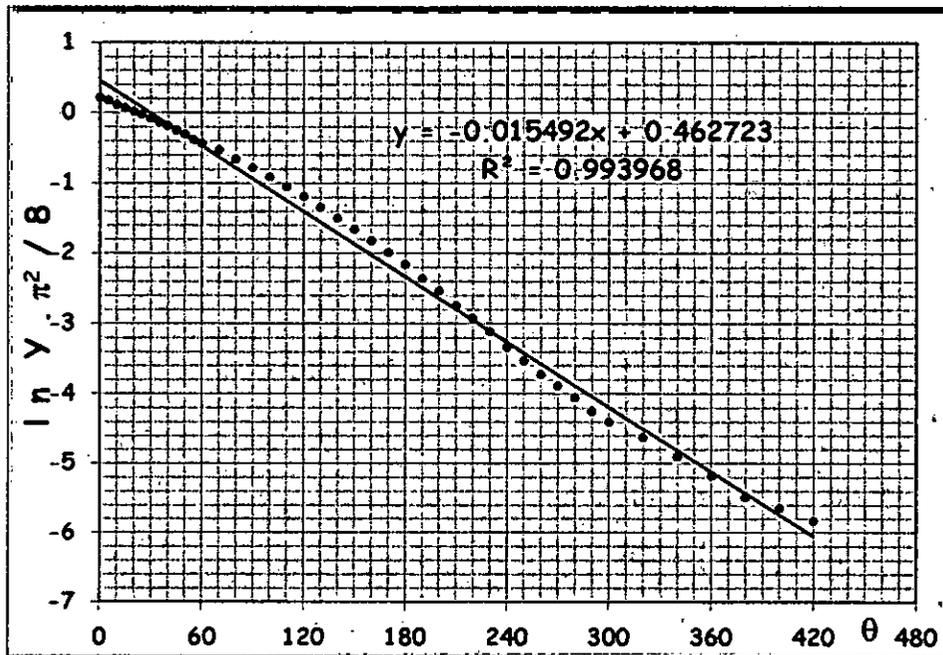
T = 40°C y V = 2 m/s

$\theta$ , min	X
0	4.0000
5	3.8746
10	3.6727
15	3.5188
20	3.3729
25	3.2297
30	3.0802
35	2.9237
40	2.7938
45	2.6479
50	2.5207
55	2.3615
60	2.2556
70	2.0831
80	1.8740
90	1.6899
100	1.5254
110	1.3670
120	1.2371
130	1.1064
140	0.9934
150	0.8982
160	0.8093
170	0.7390
180	0.6732
190	0.6127
200	0.5656
210	0.5220
220	0.4899
230	0.4624
240	0.4357
250	0.4170

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
1.0000	1.234E+00	0.2100
0.9658	1.192E+00	0.1752
0.9108	1.124E+00	0.1166
0.8689	1.072E+00	0.0695
0.8291	1.023E+00	0.0226
0.7901	9.747E-01	-0.0256
0.7494	9.245E-01	-0.0785
0.7067	8.719E-01	-0.1371
0.6713	8.282E-01	-0.1885
0.6316	7.792E-01	-0.2495
0.5969	7.364E-01	-0.3059
0.5535	6.829E-01	-0.3814
0.5247	6.473E-01	-0.4349
0.4777	5.893E-01	-0.5288
0.4207	5.190E-01	-0.6558
0.3705	4.571E-01	-0.7828
0.3257	4.018E-01	-0.9117
0.2826	3.486E-01	-1.0538
0.2472	3.049E-01	-1.1876
0.2115	2.610E-01	-1.3433
0.1808	2.230E-01	-1.5005
0.1548	1.910E-01	-1.6554
0.1306	1.611E-01	-1.8256
0.1114	1.375E-01	-1.9842
0.0935	1.154E-01	-2.1596
0.0770	9.503E-02	-2.3535
0.0642	7.918E-02	-2.5360
0.0523	6.453E-02	-2.7406
0.0436	5.377E-02	-2.9231
0.0361	4.450E-02	-3.1123
0.0288	3.553E-02	-3.3374
0.0237	2.925E-02	-3.5319

$\theta$ , min	X
260	0.4019
270	0.3912
280	0.3814
290	0.3725
300	0.3663
320	0.3592
340	0.3521
360	0.3467
380	0.3423
400	0.3405
420	0.3387

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
0.0196	2.416E-02	-3.7229
0.0167	2.058E-02	-3.8836
0.0140	1.729E-02	-4.0578
0.0116	1.430E-02	-4.2477
0.0099	1.220E-02	-4.4060
0.0080	9.812E-03	-4.6241
0.0060	7.420E-03	-4.9036
0.0046	5.626E-03	-5.1804
0.0033	4.131E-03	-5.4893
0.0029	3.533E-03	-5.6457
0.0024	2.935E-03	-5.8312



$$L = E/2 = 0.005 \text{ m}$$

$$D_w \cdot \pi^2 / 4 L^2 = 0.015492$$

$$D_w = 1.57 \text{ E-07 m}^2/\text{min} = 2.62 \text{ E-09 m}^2/\text{s}$$

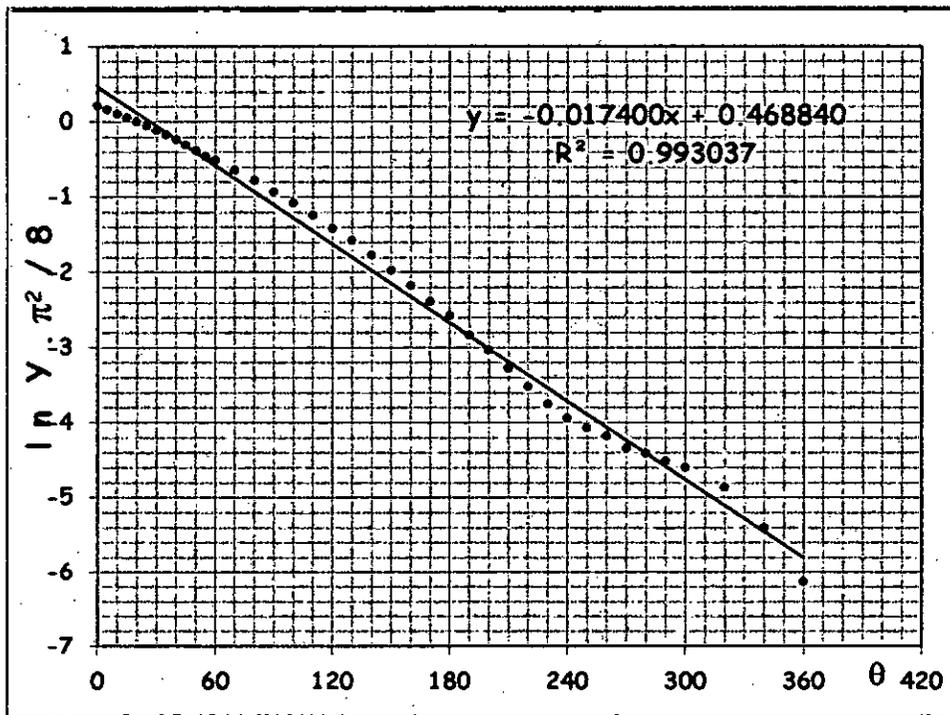
$$T = 50^{\circ}\text{C} \quad y \quad V = 2 \text{ m/s}$$

$\theta, \text{ min}$	X
0	4.0000
5	3.8285
10	3.6260
15	3.4454
20	3.2784
25	3.1051
30	2.9309
35	2.7867
40	2.6189
45	2.4537
50	2.2932
55	2.1226
60	2.0323
70	1.8024
80	1.5862
90	1.3919
100	1.2240
110	1.0598
120	0.9184
130	0.8044
140	0.6922
150	0.5946
160	0.5134
170	0.4477
180	0.3985
190	0.3437
200	0.3100
210	0.2781
220	0.2525
230	0.2334
240	0.2206
250	0.2133

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
1.0000	1.234E+00	0.2100
0.9553	1.179E+00	0.1643
0.9026	1.114E+00	0.1075
0.8556	1.056E+00	0.0540
0.8121	1.002E+00	0.0019
0.7670	9.462E-01	-0.0553
0.7216	8.902E-01	-0.1163
0.6840	8.439E-01	-0.1697
0.6403	7.900E-01	-0.2358
0.5973	7.369E-01	-0.3053
0.5555	6.853E-01	-0.3778
0.5111	6.305E-01	-0.4612
0.4876	6.015E-01	-0.5083
0.4277	5.277E-01	-0.6393
0.3714	4.582E-01	-0.7804
0.3208	3.958E-01	-0.9269
0.2771	3.419E-01	-1.0734
0.2343	2.891E-01	-1.2410
0.1975	2.437E-01	-1.4119
0.1678	2.070E-01	-1.5749
0.1386	1.710E-01	-1.7662
0.1132	1.396E-01	-1.9688
0.0920	1.135E-01	-2.1756
0.0749	9.244E-02	-2.3812
0.0621	7.661E-02	-2.5690
0.0478	5.903E-02	-2.8297
0.0391	4.818E-02	-3.0327
0.0307	3.793E-02	-3.2721
0.0241	2.972E-02	-3.5159
0.0191	2.357E-02	-3.7479
0.0158	1.946E-02	-3.9392
0.0139	1.712E-02	-4.0676

$\theta$ , min	X
260	0.2078
270	0.2005
280	0.1978
290	0.1941
300	0.1914
320	0.1841
340	0.1741
360	0.1668

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
0.0125	1.536E-02	-4.1760
0.0105	1.302E-02	-4.3416
0.0098	1.214E-02	-4.4116
0.0089	1.096E-02	-4.5132
0.0082	1.008E-02	-4.5968
0.0063	7.740E-03	-4.8614
0.0037	4.516E-03	-5.4002
0.0018	2.171E-03	-6.1325



$$L = E/2 = 0.005 \text{ m}$$

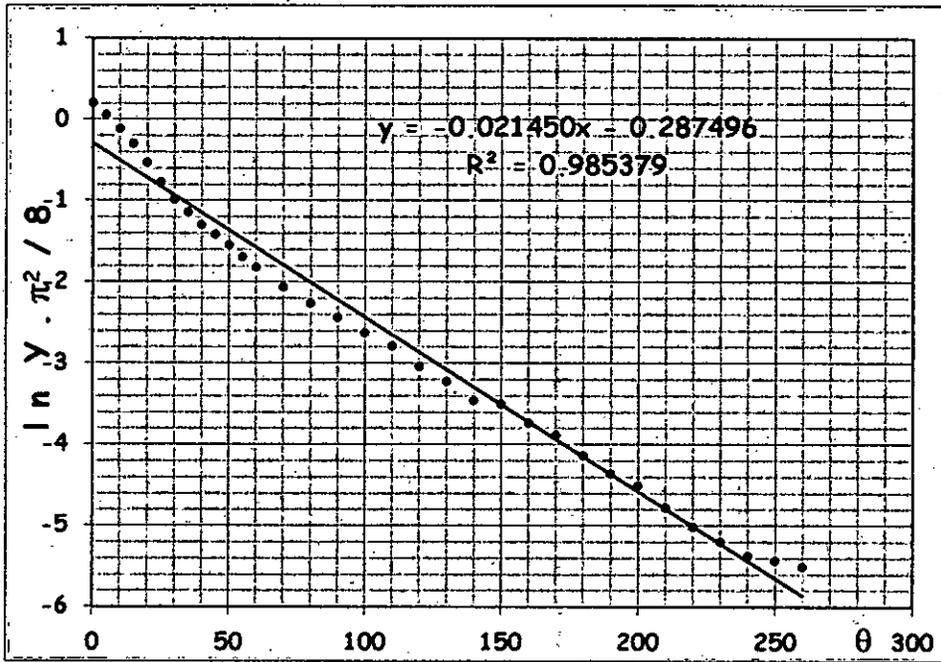
$$D_w \cdot \pi^2 / 4 L^2 = 0.018405$$

$$D_w = 1.76 \text{ E-07 m}^2/\text{min} = 2.94 \text{ E-09 m}^2/\text{s}$$

$T = 60^{\circ}\text{C}$  y  $V = 2 \text{ m/s}$

$\theta, \text{ min}$	X
0	4.0000
5	3.4604
10	2.9236
15	2.4564
20	1.9764
25	1.5715
30	1.2966
35	1.1290
40	0.9861
45	0.8853
50	0.7955
55	0.7039
60	0.6325
70	0.5253
80	0.4511
90	0.3989
100	0.3531
110	0.3182
120	0.2752
130	0.2505
140	0.2239
150	0.2202
160	0.2001
170	0.1900
180	0.1753
190	0.1653
200	0.1598
210	0.1515
220	0.1458
230	0.1424
240	0.1396
250	0.1387
260	0.1378

Y	$Y \cdot \pi^2 / 8$	$\ln Y \cdot \pi^2 / 8$
1.0000	1.234E+00	0.2100
0.8608	1.062E+00	0.0601
0.7222	8.910E-01	-0.1154
0.6017	7.423E-01	-0.2981
0.4778	5.894E-01	-0.5286
0.3733	4.605E-01	-0.7754
0.3024	3.730E-01	-0.9861
0.2591	3.196E-01	-1.1406
0.2222	2.741E-01	-1.2941
0.1962	2.421E-01	-1.4186
0.1730	2.135E-01	-1.5442
0.1494	1.843E-01	-1.6911
0.1310	1.616E-01	-1.8229
0.1033	1.274E-01	-2.0601
0.0841	1.038E-01	-2.2651
0.0707	8.719E-02	-2.4397
0.0589	7.261E-02	-2.6227
0.0499	6.153E-02	-2.7883
0.0388	4.782E-02	-3.0404
0.0324	3.994E-02	-3.2203
0.0255	3.148E-02	-3.4583
0.0246	3.032E-02	-3.4960
0.0194	2.390E-02	-3.7338
0.0168	2.069E-02	-3.8780
0.0130	1.603E-02	-4.1335
0.0104	1.282E-02	-4.3569
0.0090	1.107E-02	-4.5037
0.0068	8.444E-03	-4.7744
0.0054	6.635E-03	-5.0154
0.0045	5.527E-03	-5.1981
0.0038	4.652E-03	-5.3705
0.0035	4.360E-03	-5.4352
0.0033	4.069E-03	-5.5044



$$L = E/2 = 0.005 \text{ m}$$

$$D_w \cdot \pi^2/4 L^2 = 0.021450$$

$$D_w = 2.17 \text{ E-07 m}^2/\text{min} = 3.62 \text{ E-09 m}^2/\text{s}$$

**Anexo 7**  
**Cálculo de Energía de Activación**

Ecuación de Arrhenius:  $D_w = D_{w0} \cdot e^{-E_a/R \cdot T}$

$$R = 8.314472 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{K}$$

Linearizando la ecuación:  $\ln D_w = \ln D_{w0} - (E_a/R) \cdot (1/T)$

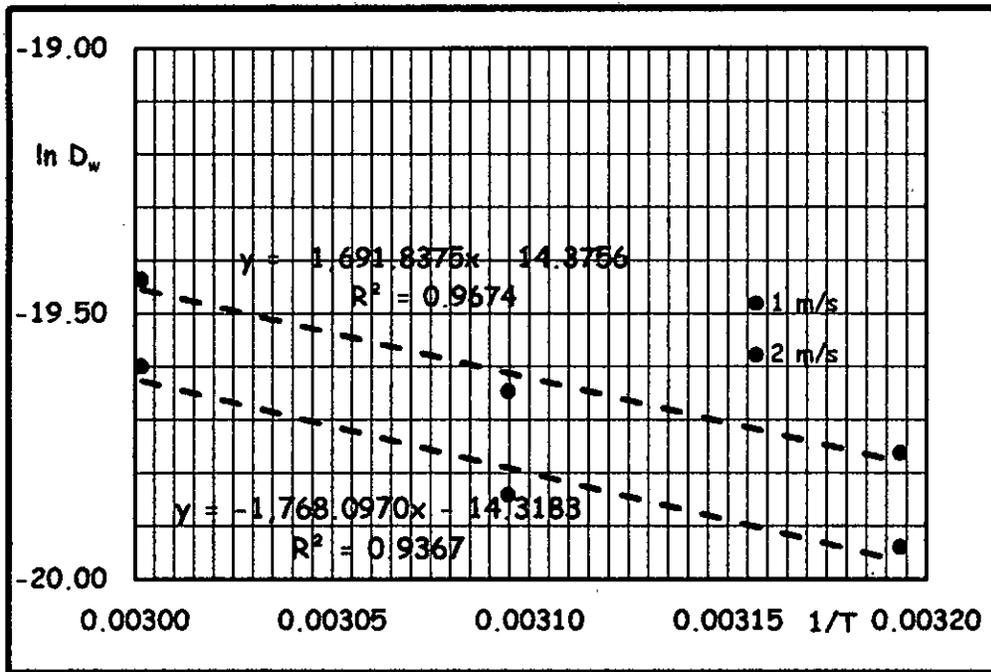
donde la pendiente  $m = -E_a/R$  se obtiene por regresión lineal

Luego la energía de activación:  $E_a = -m \cdot R$

T °C	D <sub>w</sub> m <sup>2</sup> /s	
	1 m/s	2 m/s
40	2.19 E-09	2.62 E-09
50	2.42 E-09	2.94 E-09
60	3.08 E-09	3.62 E-09

1 m/s		
T °K	1/T	log D <sub>w</sub>
313.15	0.00319	-19.940
323.15	0.00309	-19.841
333.15	0.00300	-19.599

2 m/s		
T °K	1/T	log D <sub>w</sub>
313.15	0.00319	-19.762
323.15	0.00309	-19.645
333.15	0.00300	-19.436



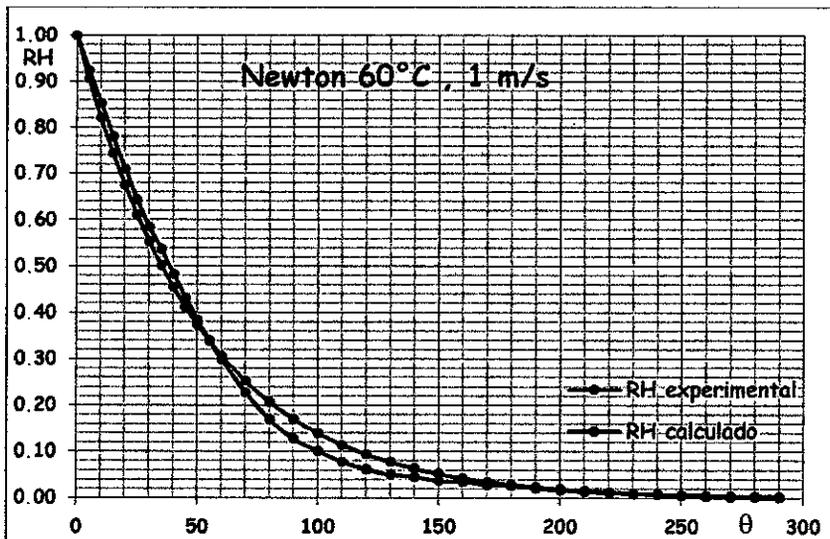
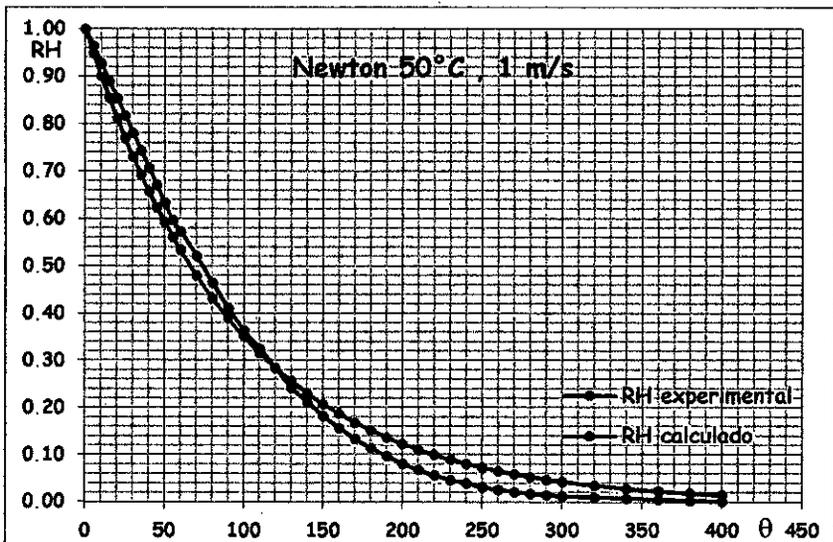
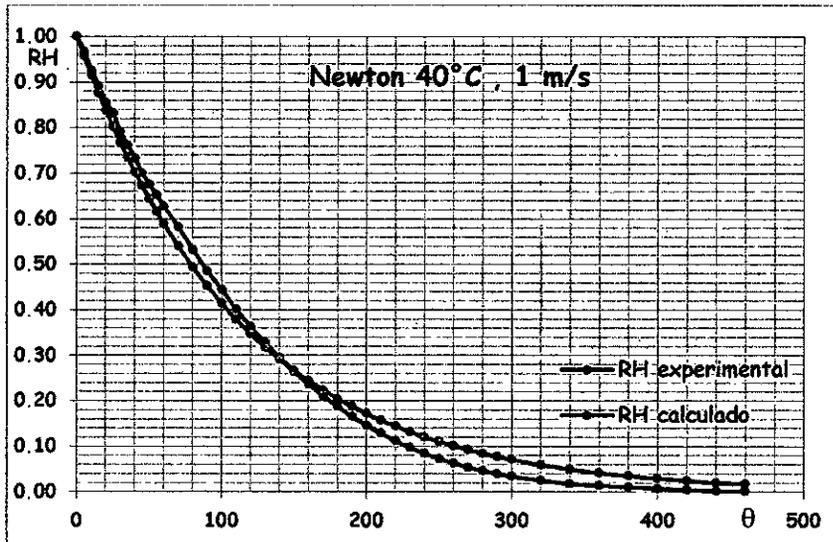
Por regresión lineal:

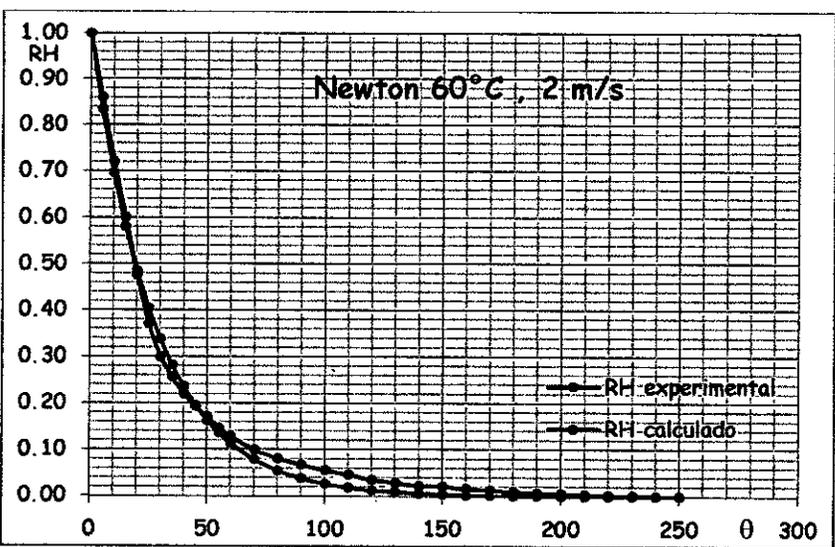
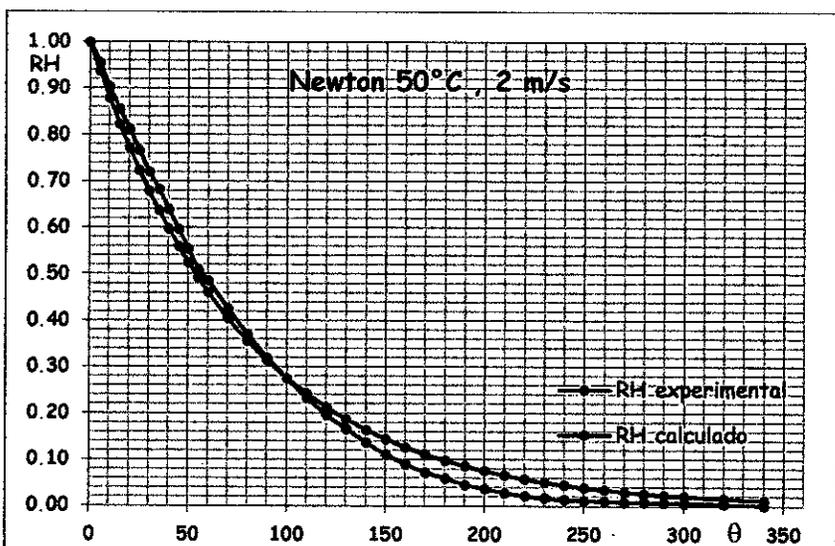
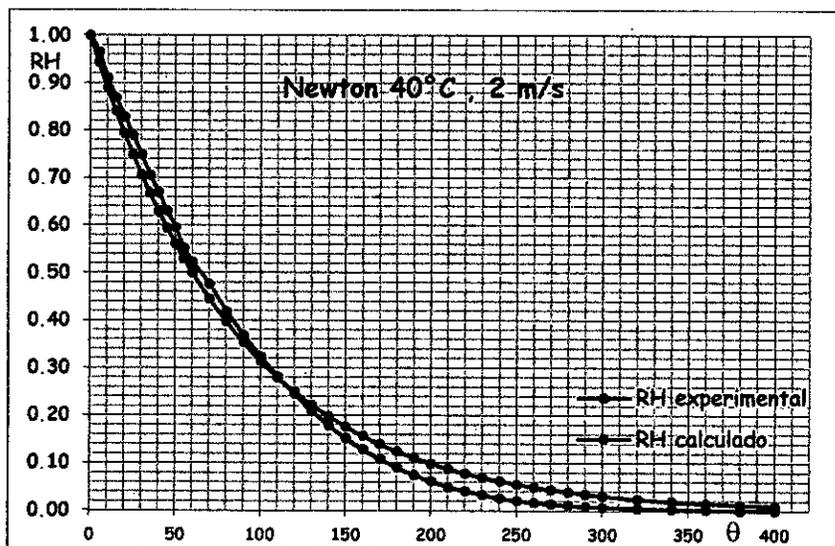
	m	Ea J/mol	Ea kJ/mol
1 m/s	- 1691.8375	14700.7096	14.70
2 m/s	-1768,0970	14066.7354	14.07

Anexo 8:

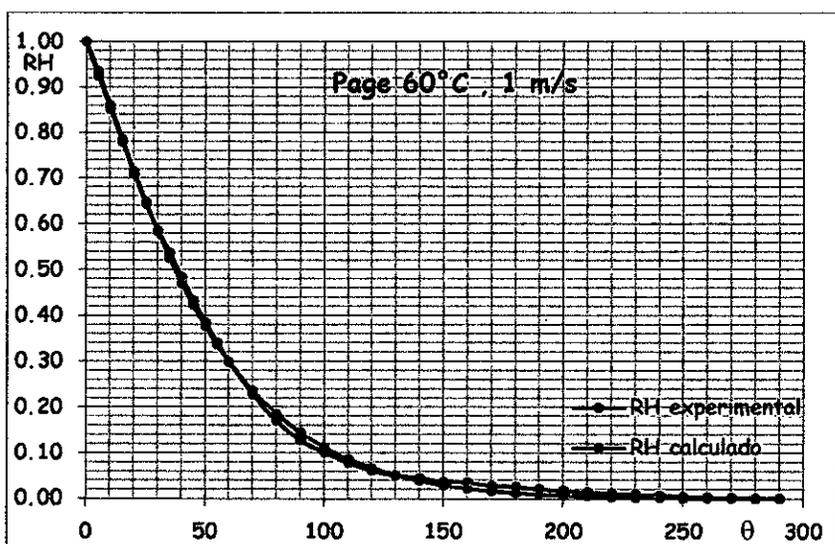
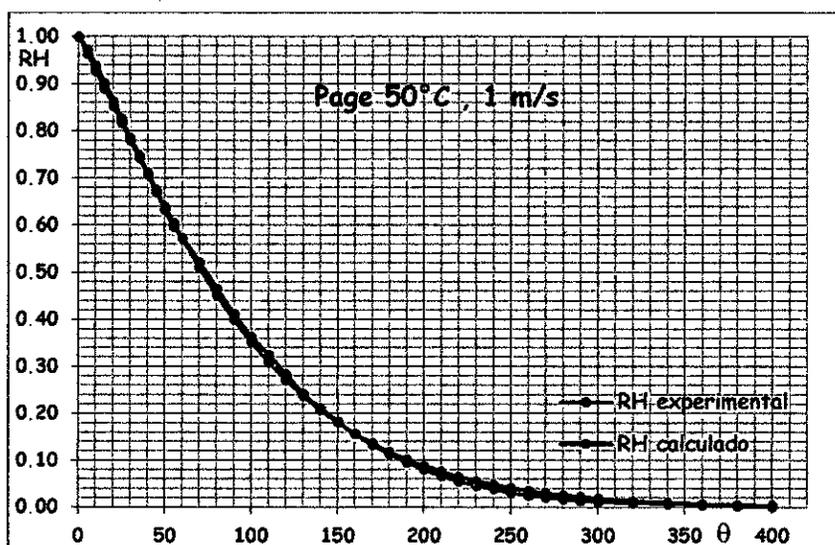
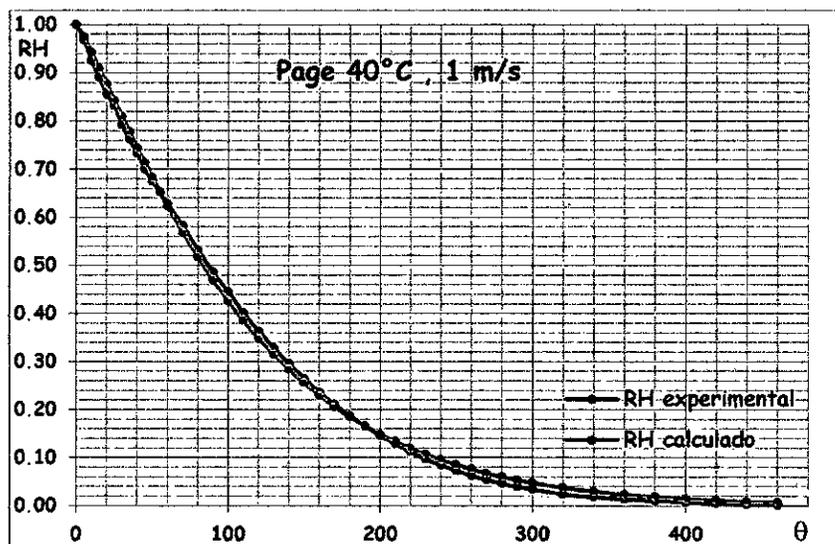
CURVAS DE SECADO EXPERIMENTAL Y CALCULADA

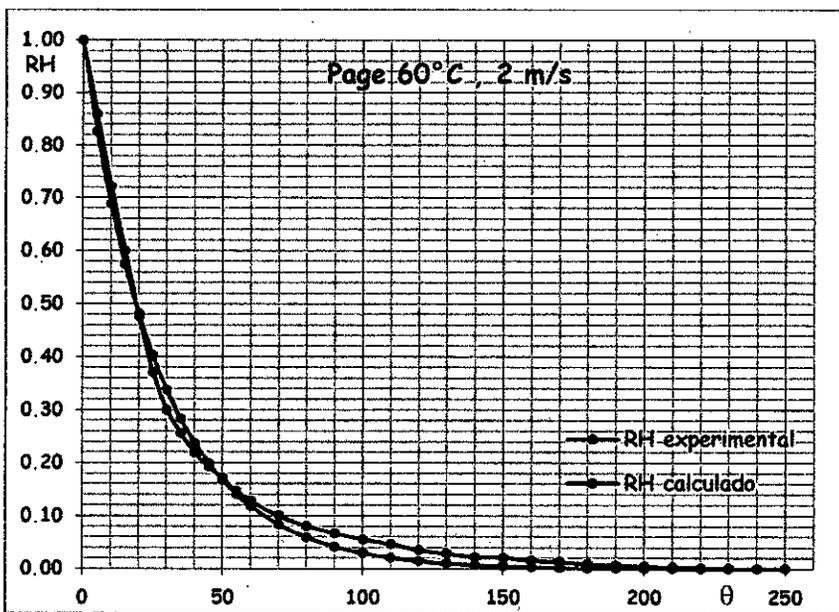
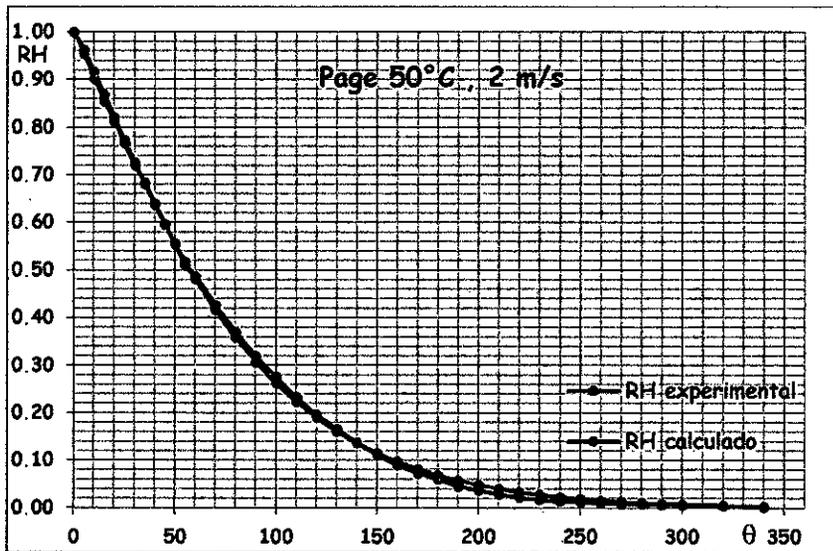
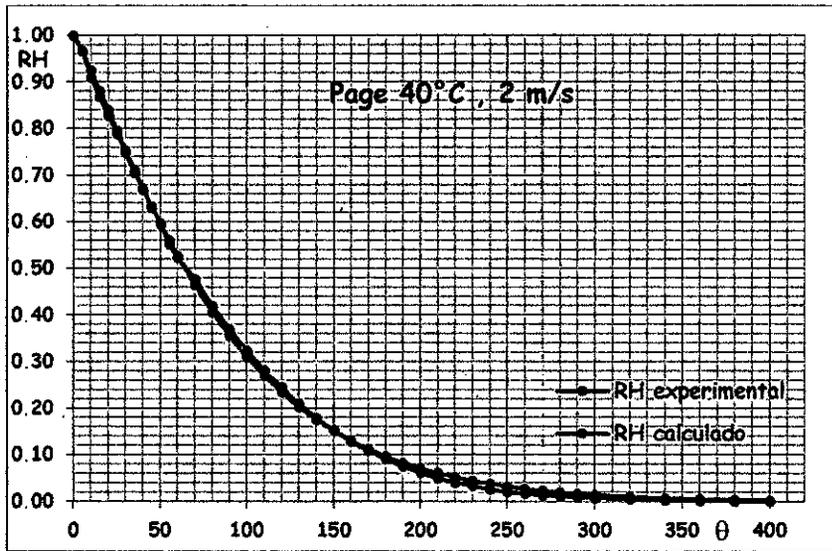
## MODELO DE NEWTON



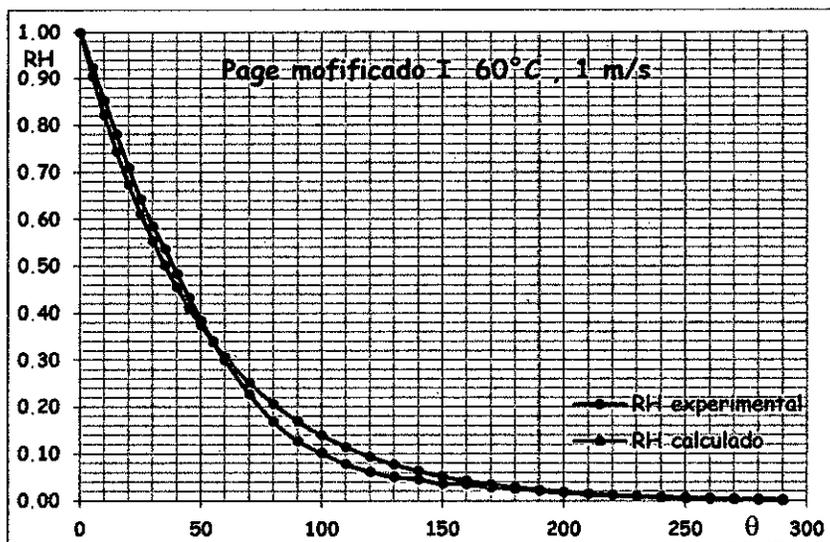
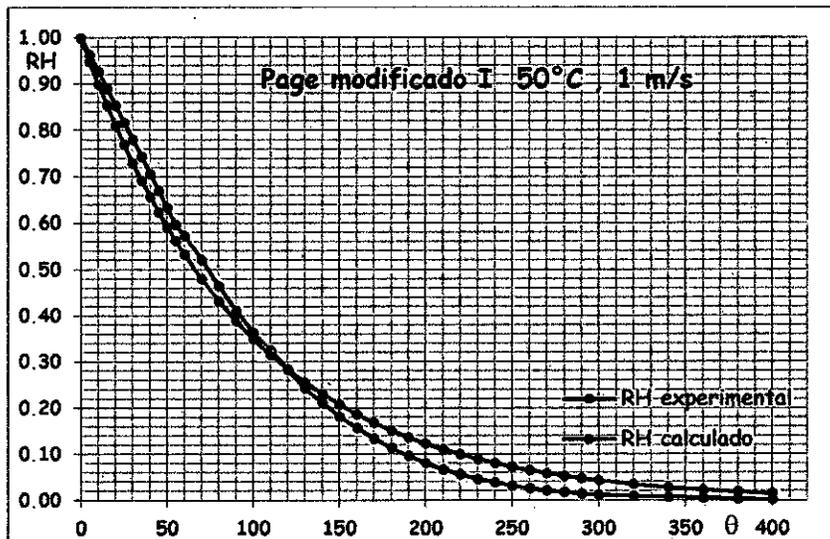
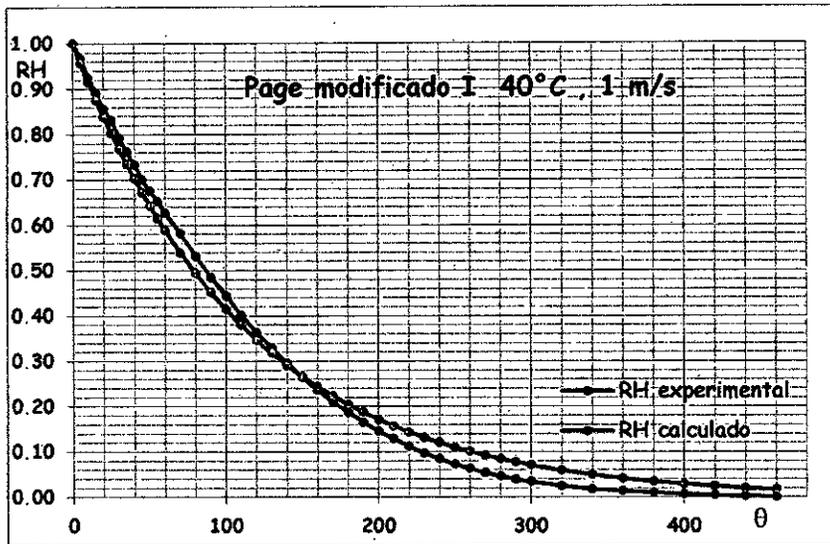


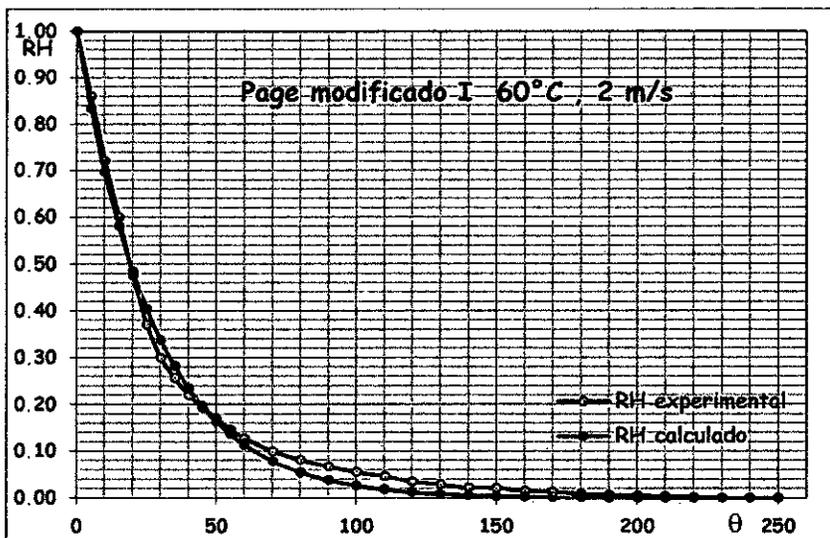
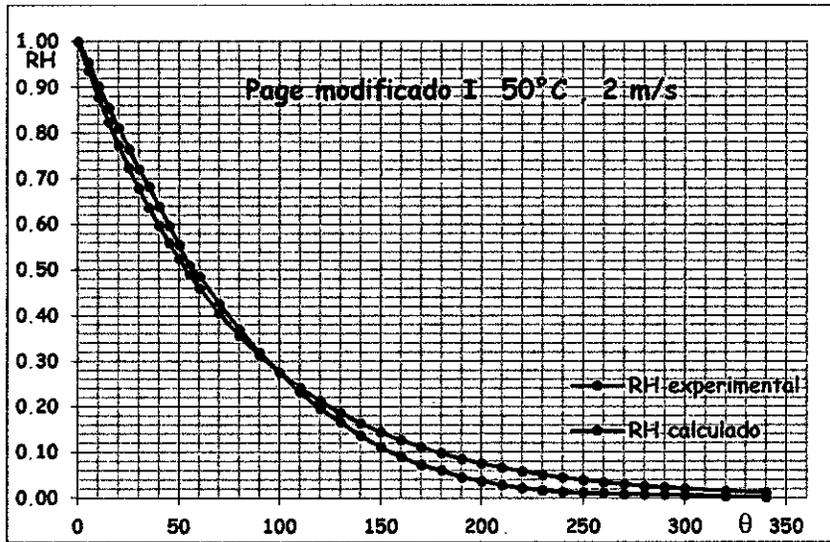
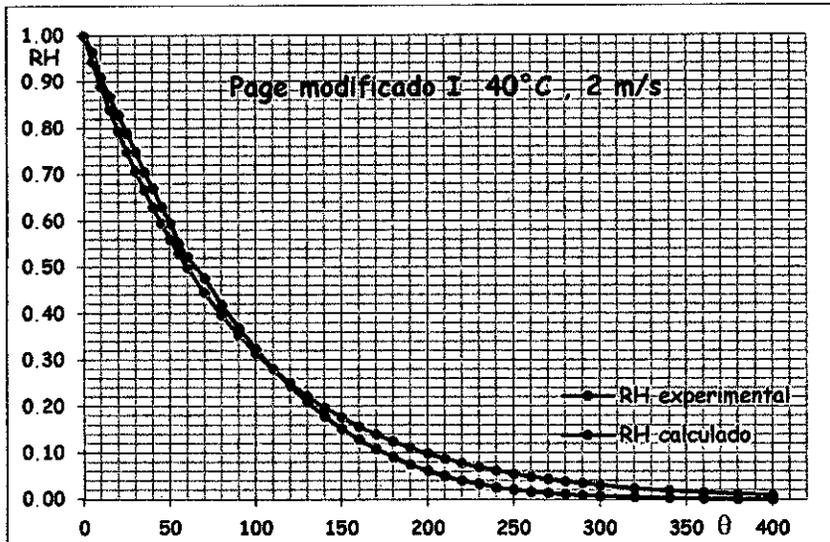
## MODELO DE PAGE



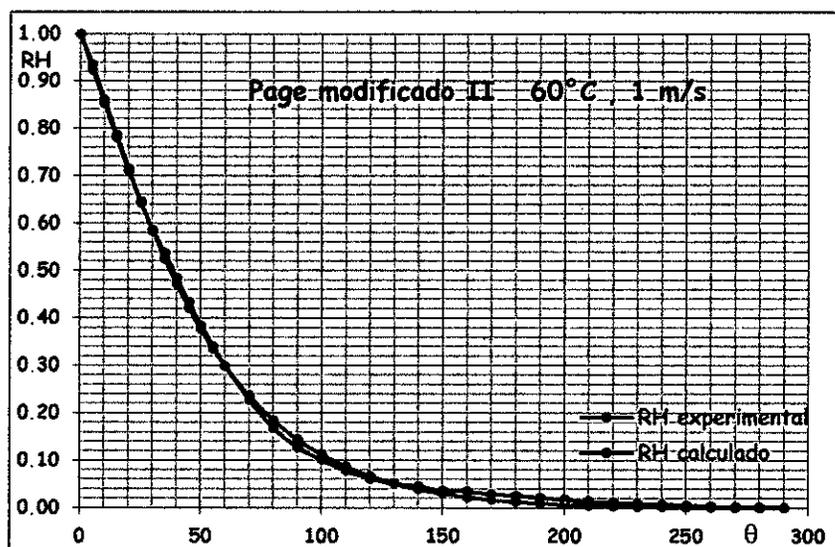
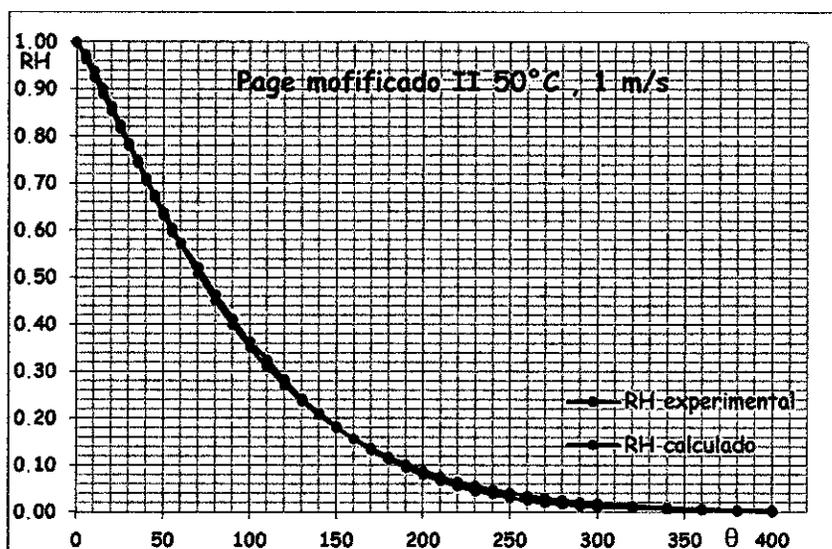
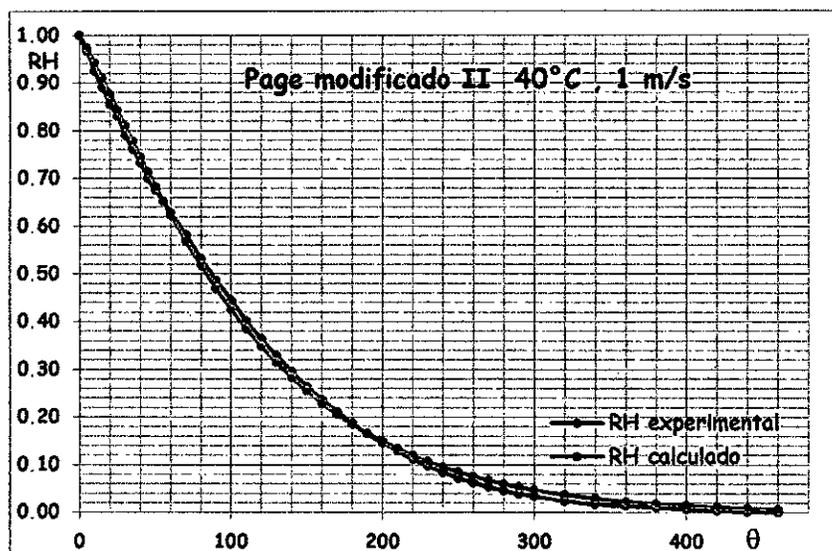


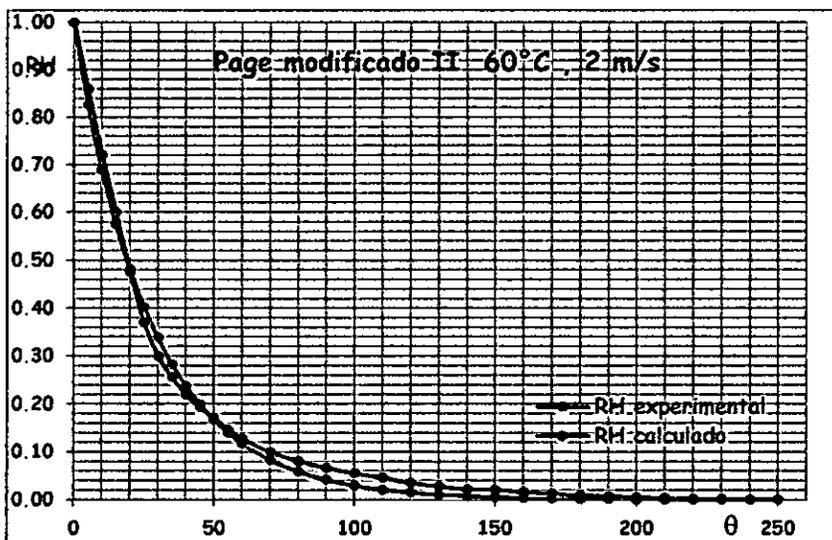
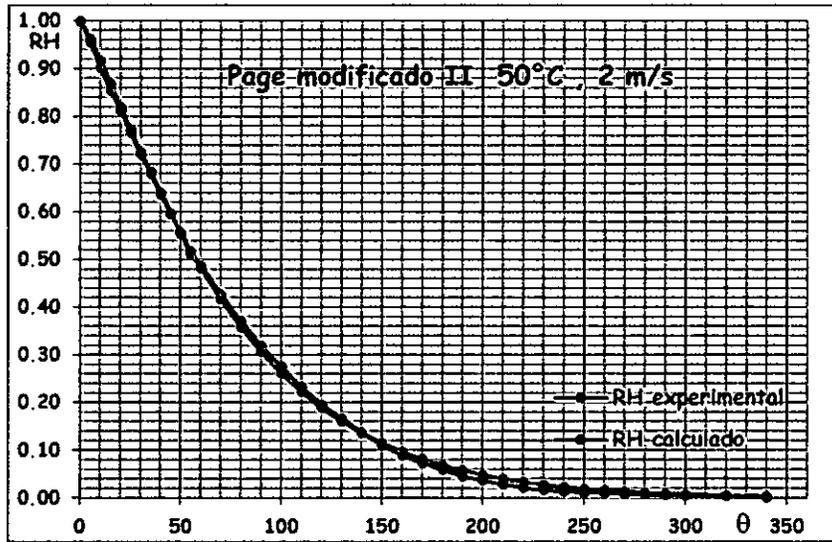
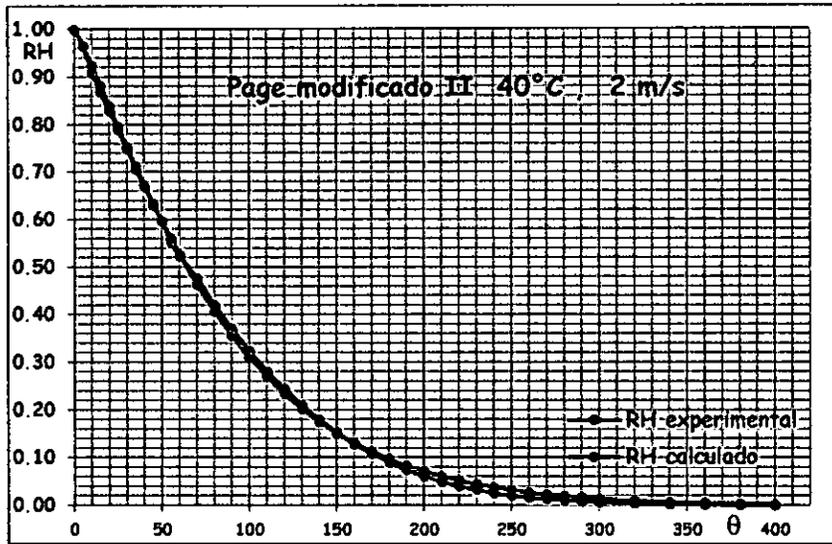
## MODELO DE PAGE MODIFICADO I



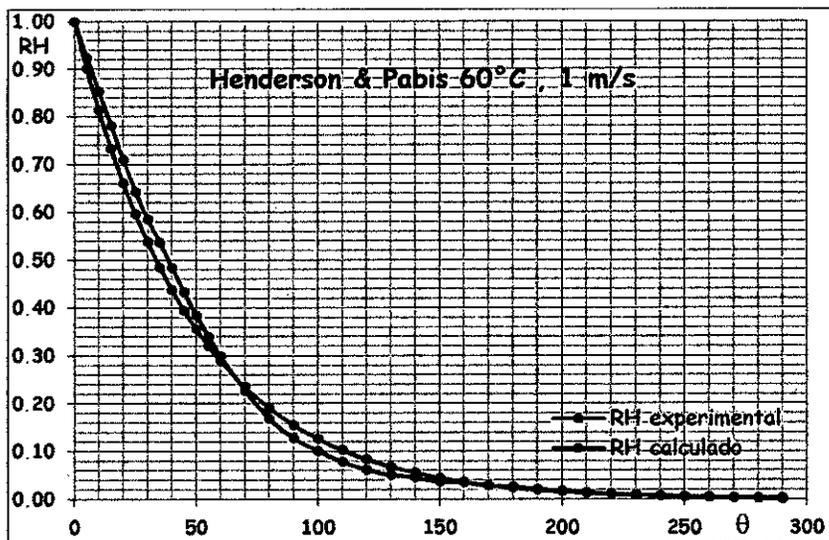
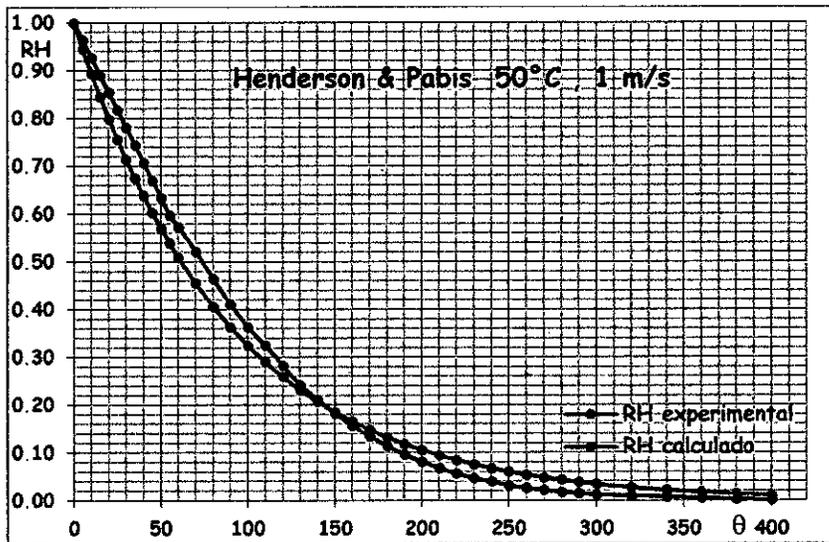
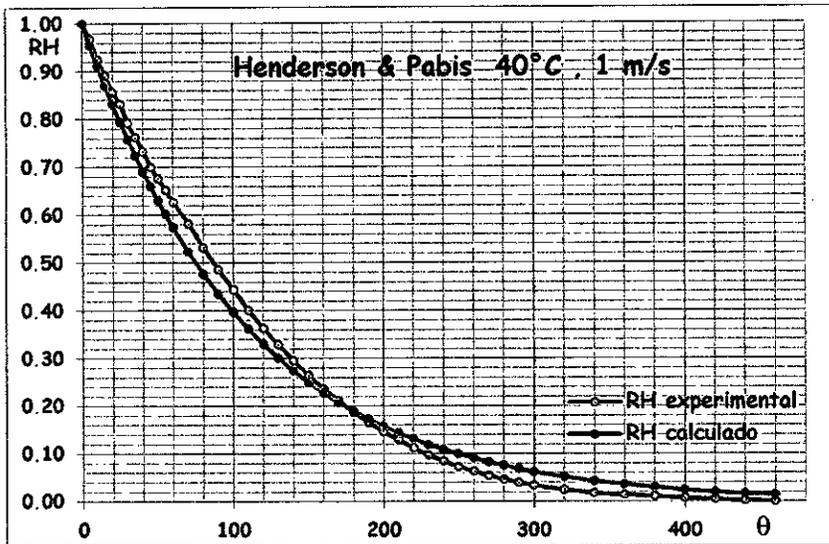


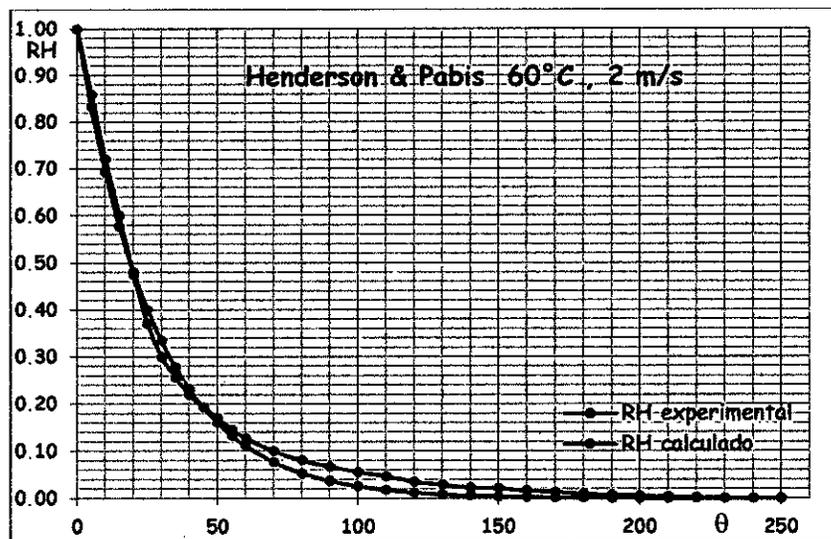
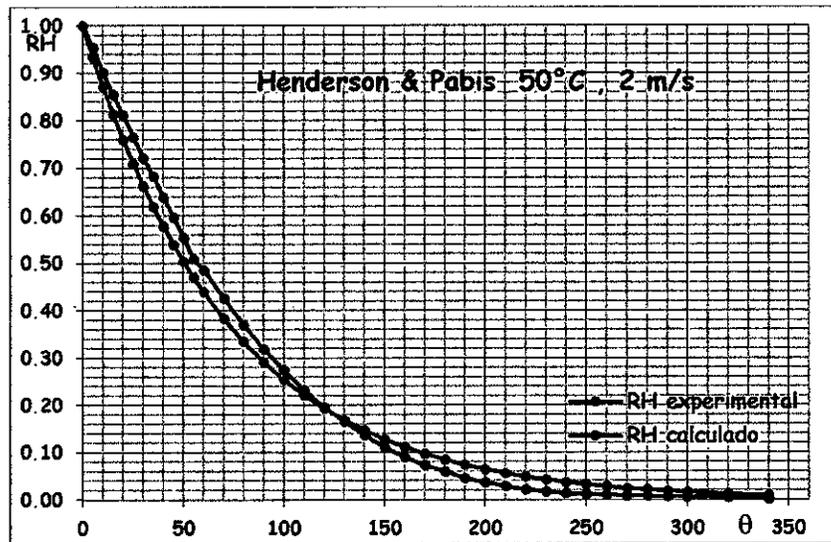
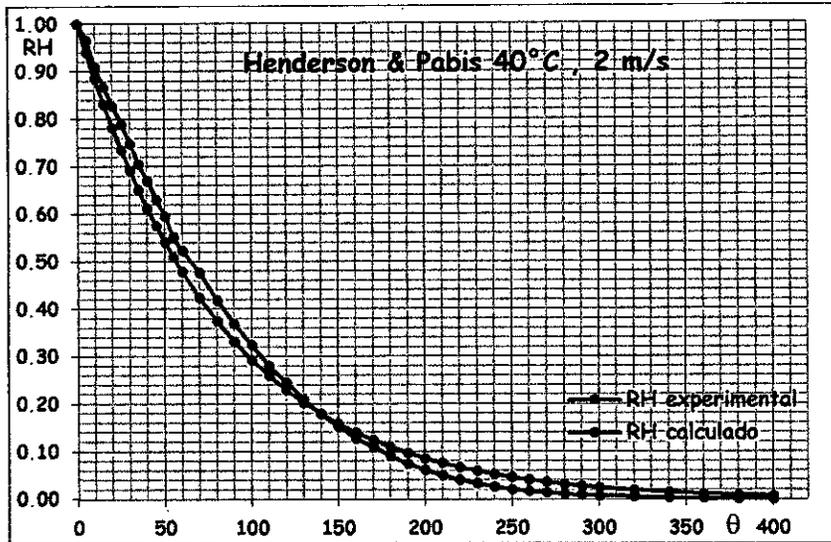
## MODELO DE PAGE MODIFICADO II



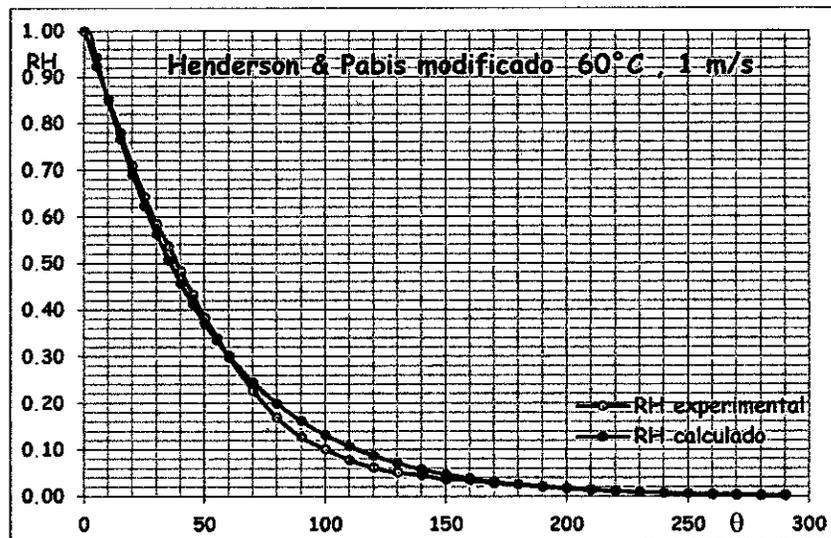
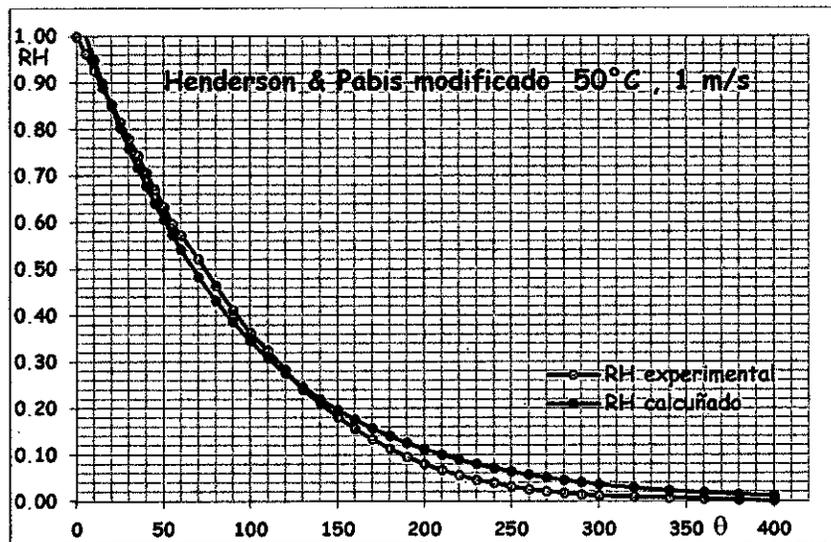
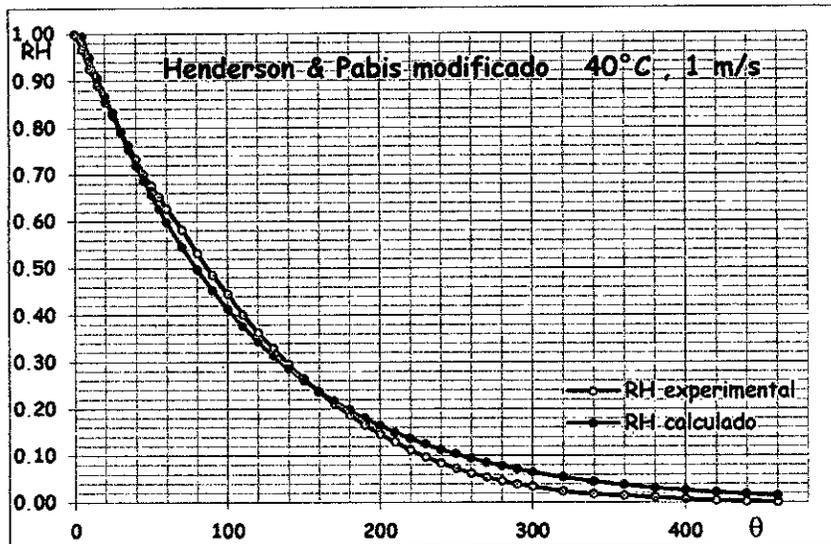


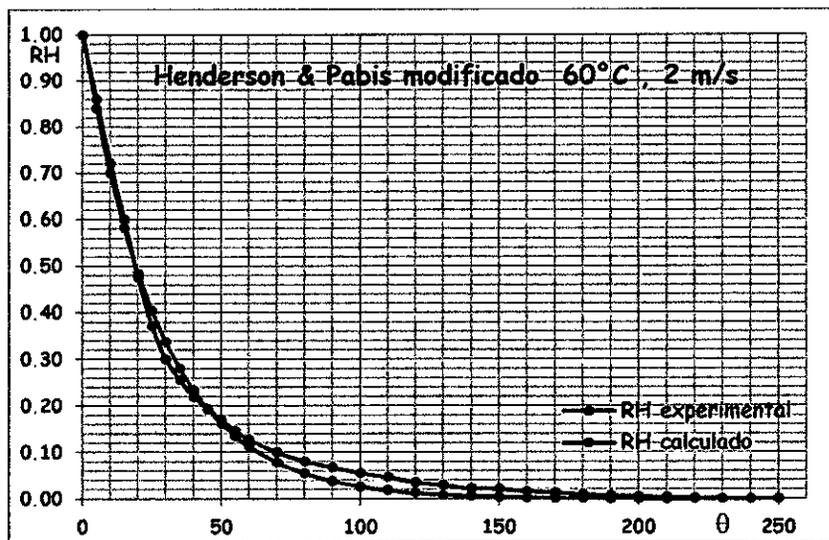
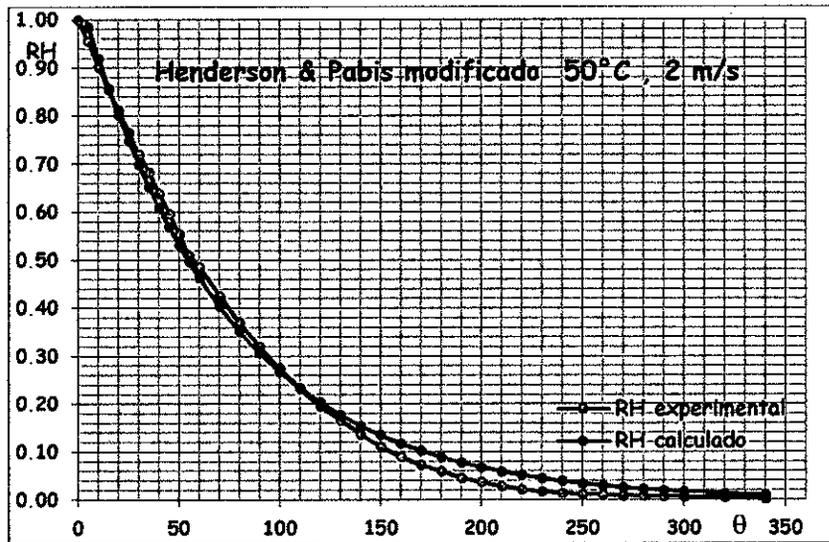
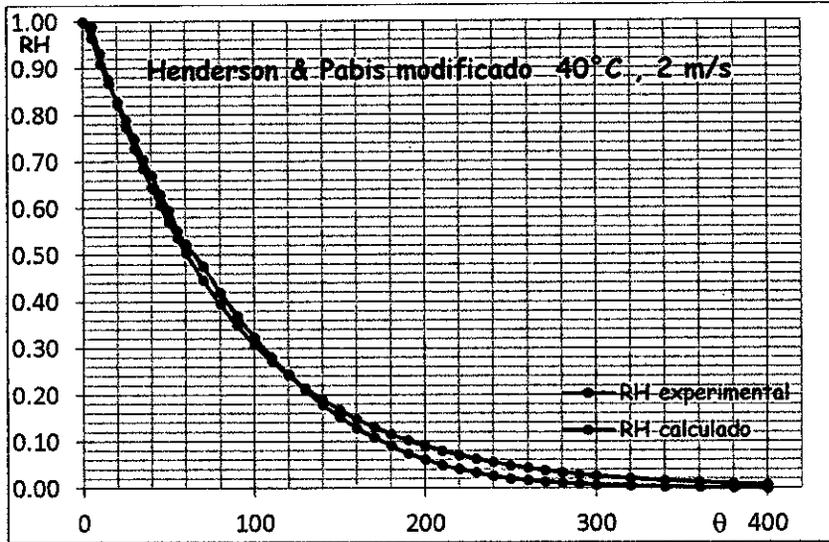
## MODELO DE HENDERSON & PABIS



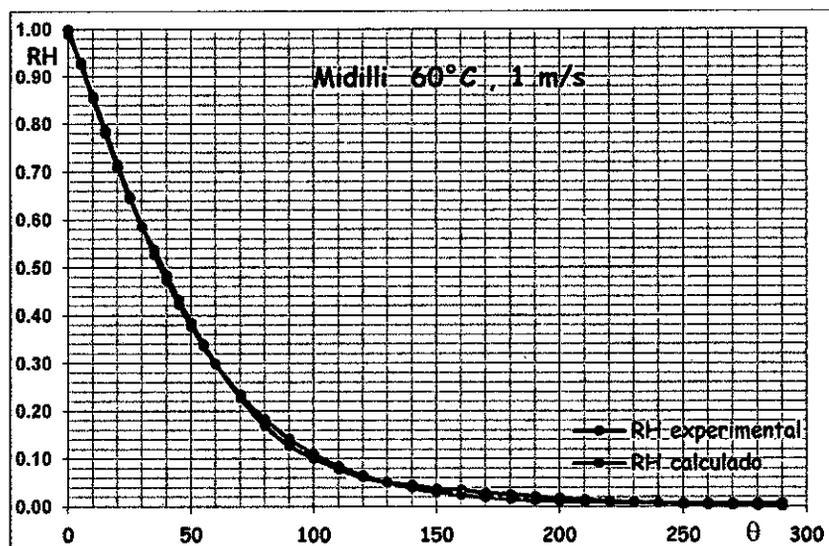
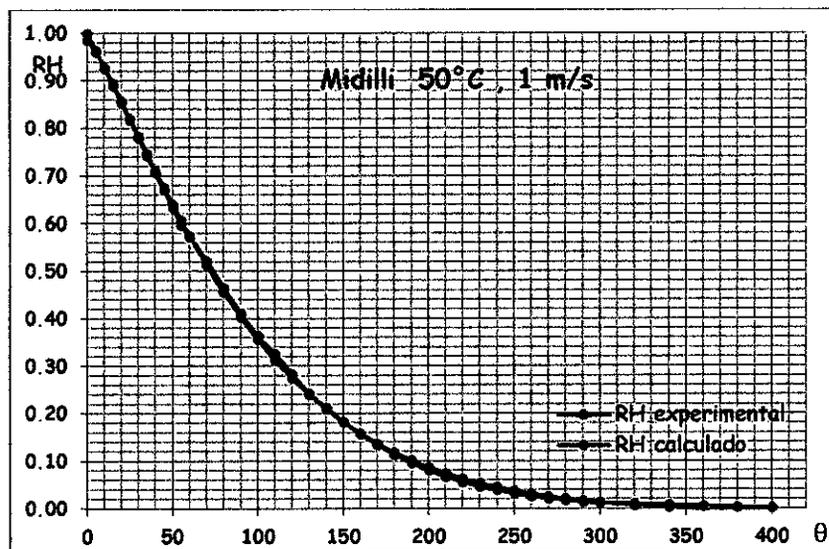
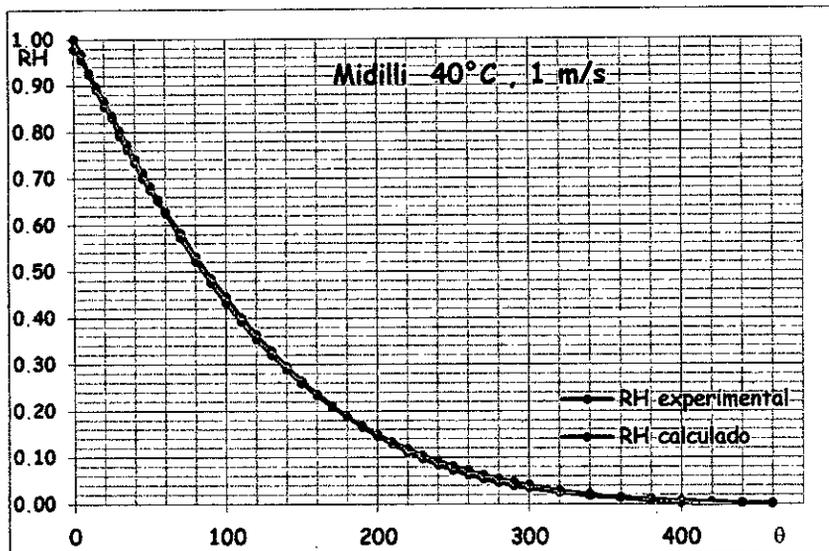


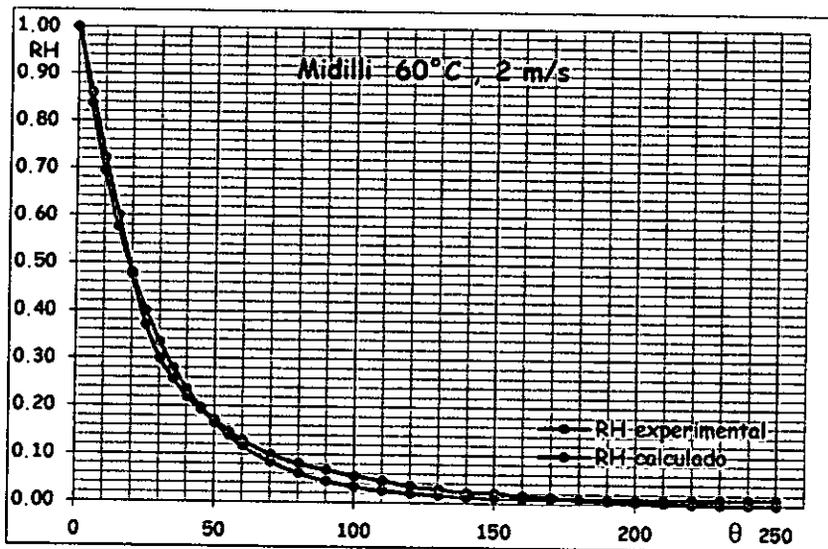
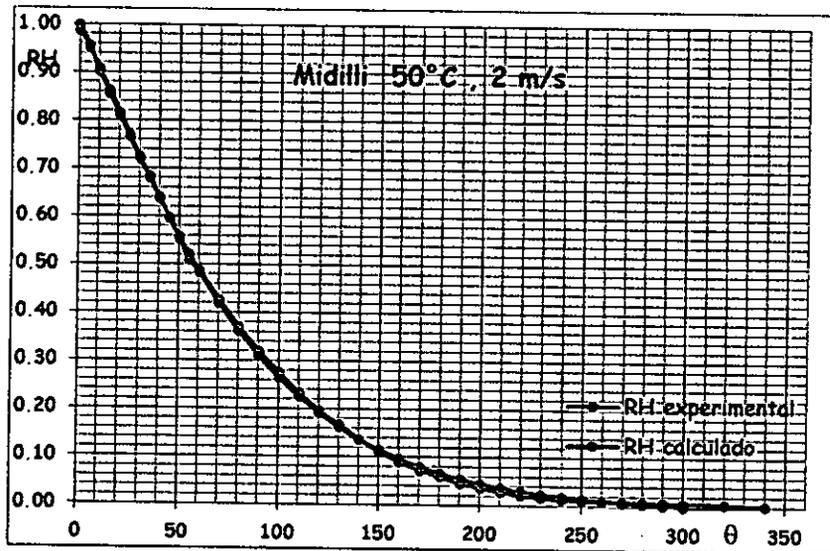
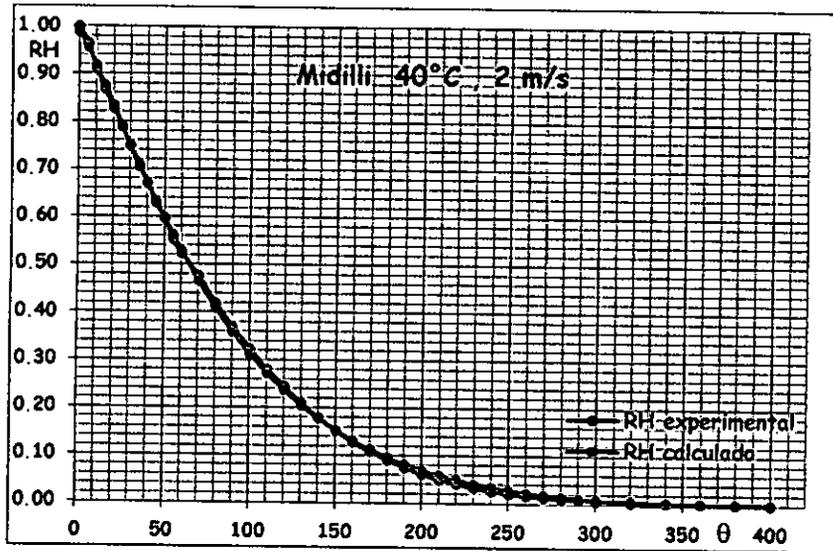
## MODELO DE HENDERSON & PABIS MODIFICADO



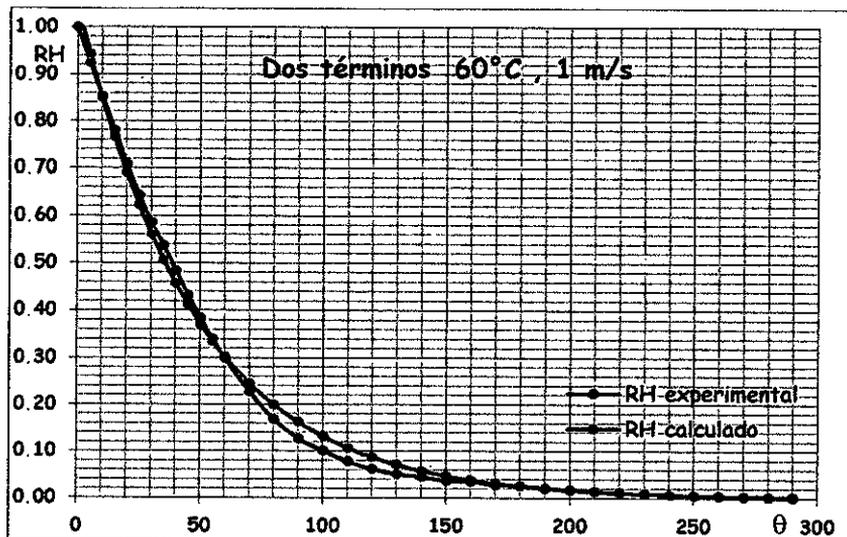
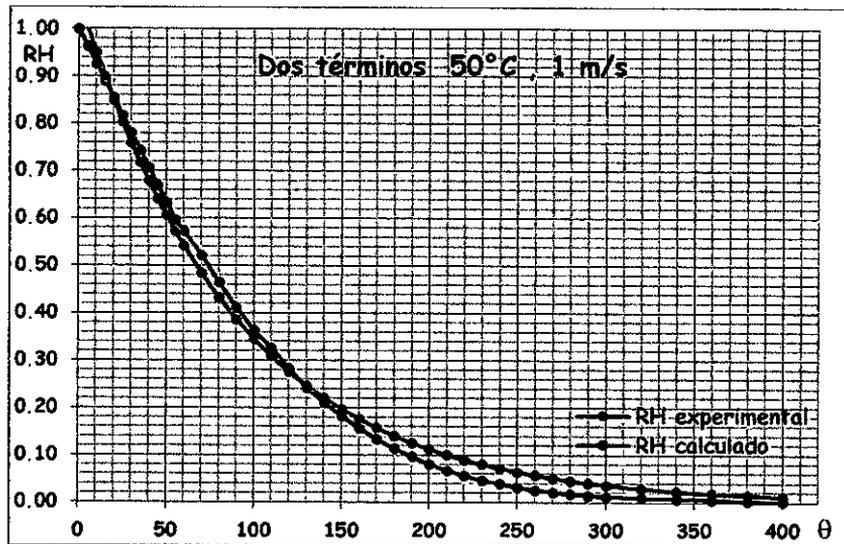
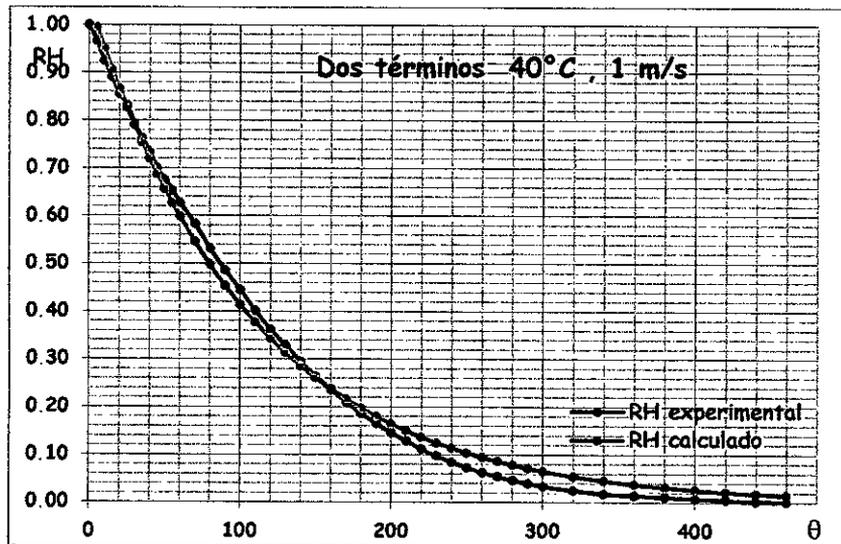


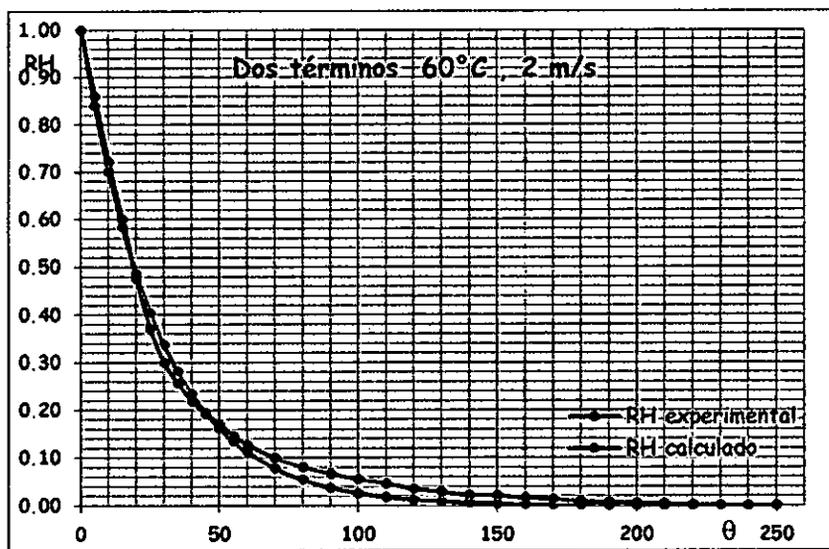
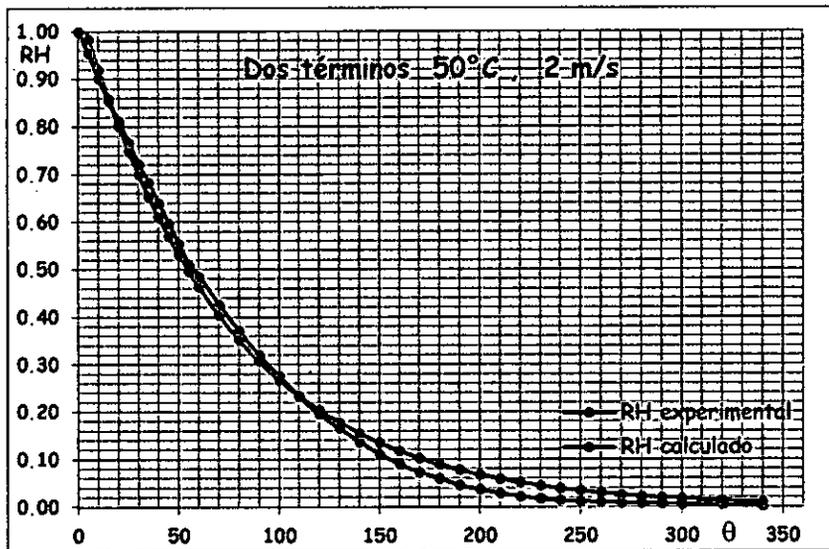
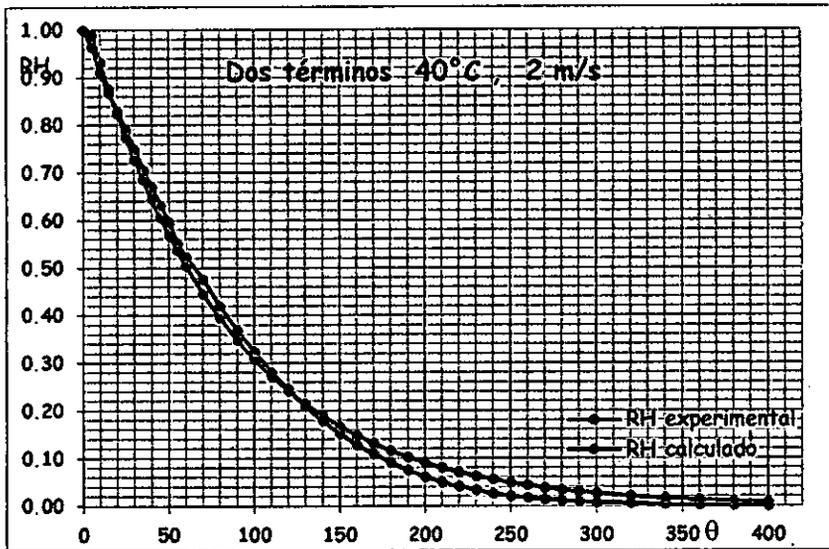
## MODELO DE MIDILLI



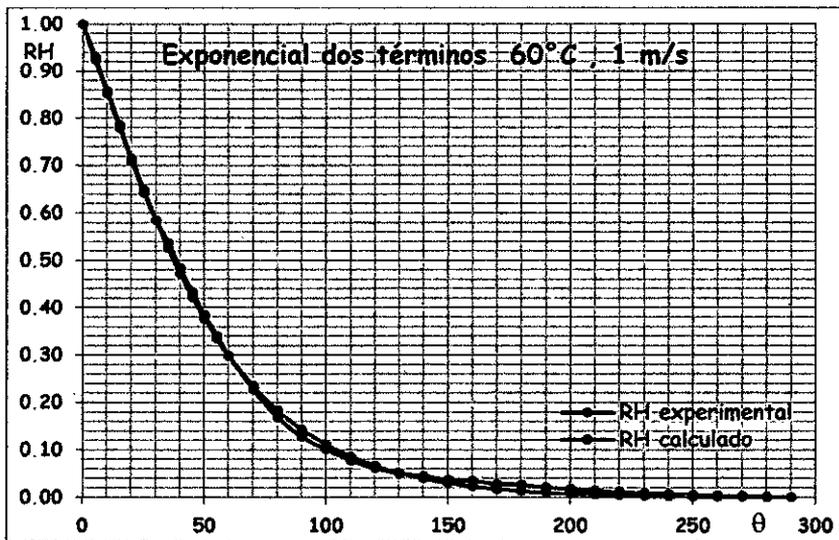
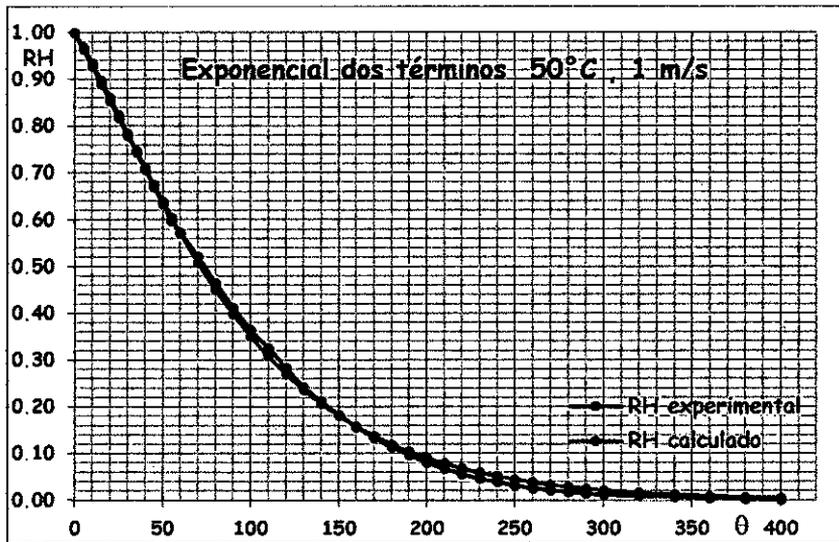
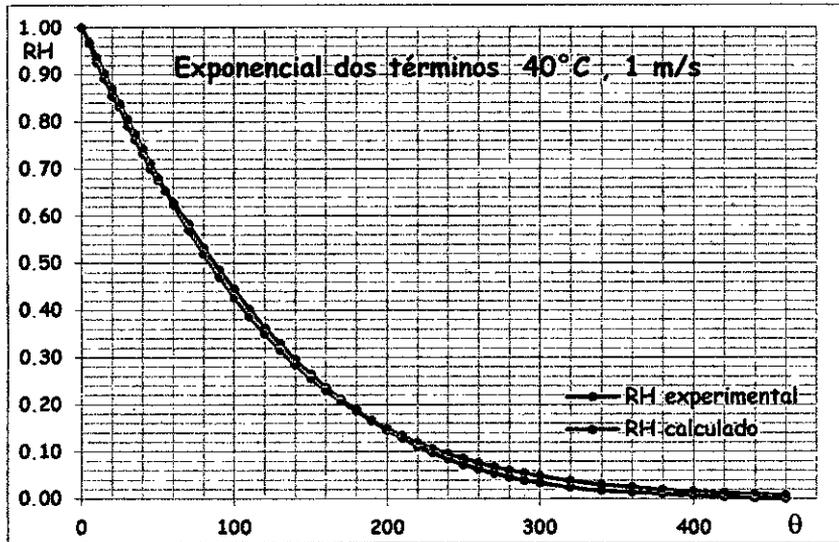


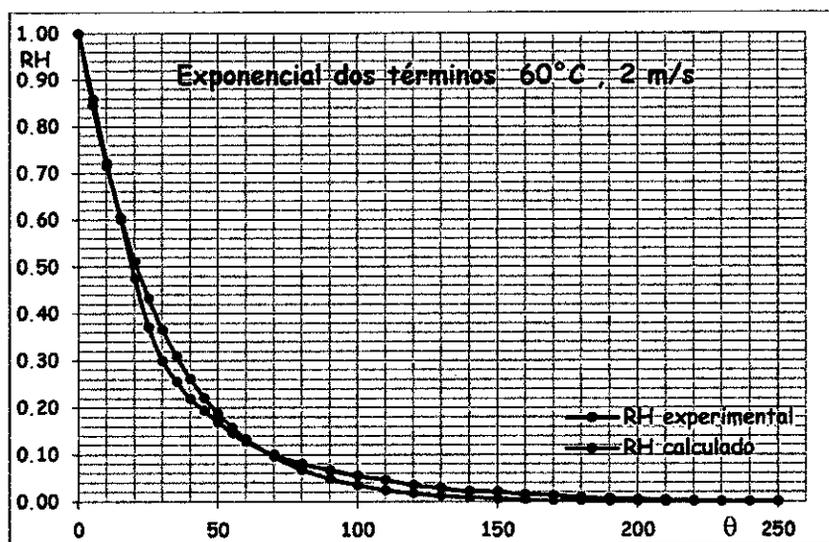
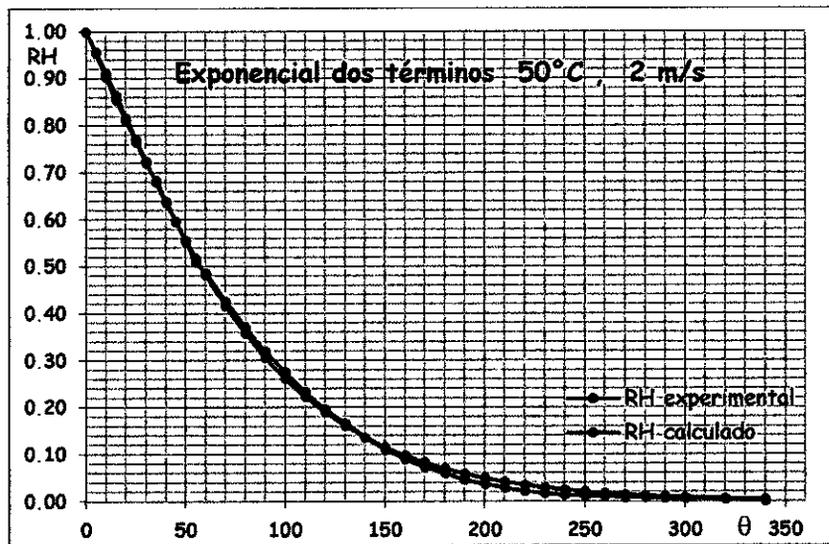
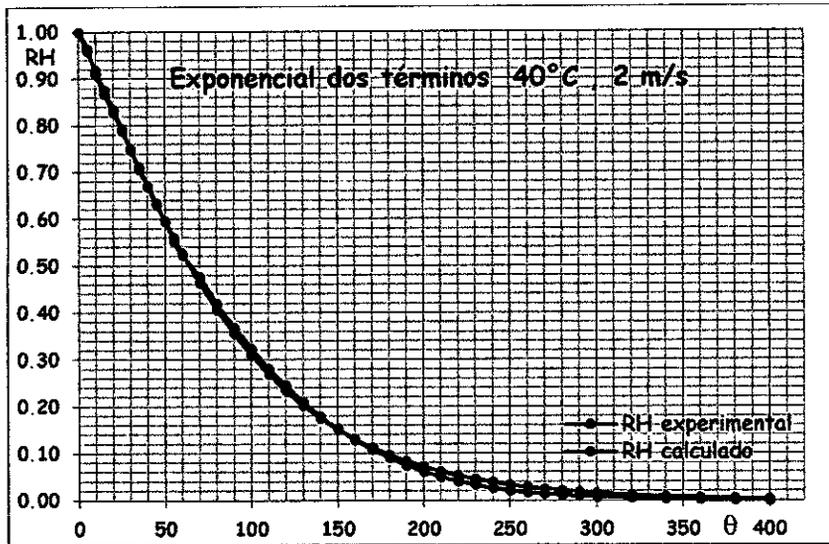
## MODELO DE DOS TÉRMINOS



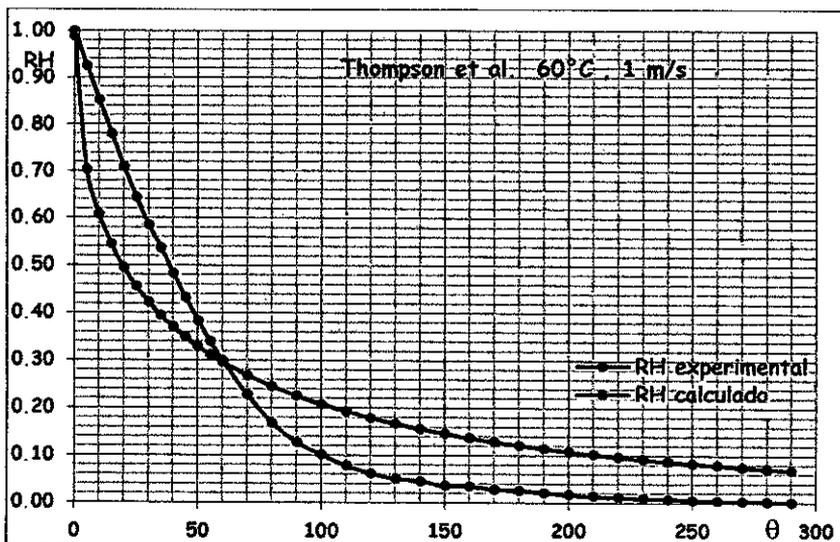
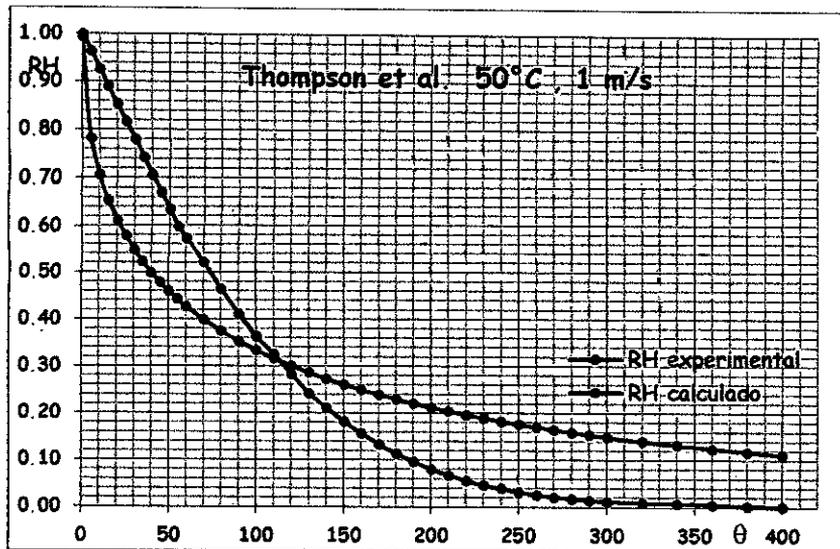
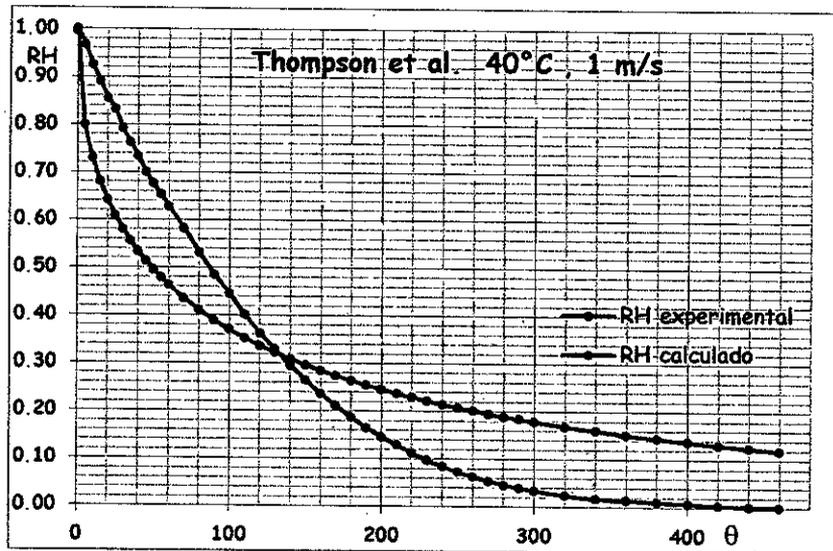


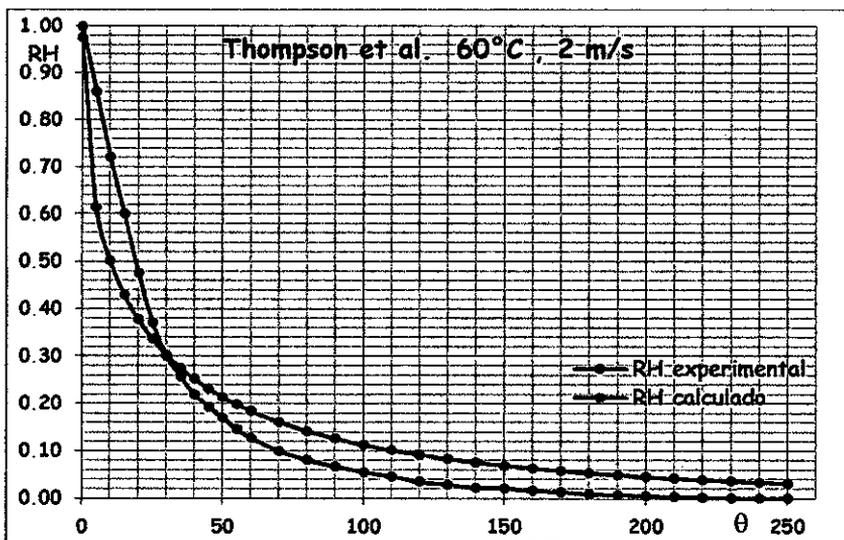
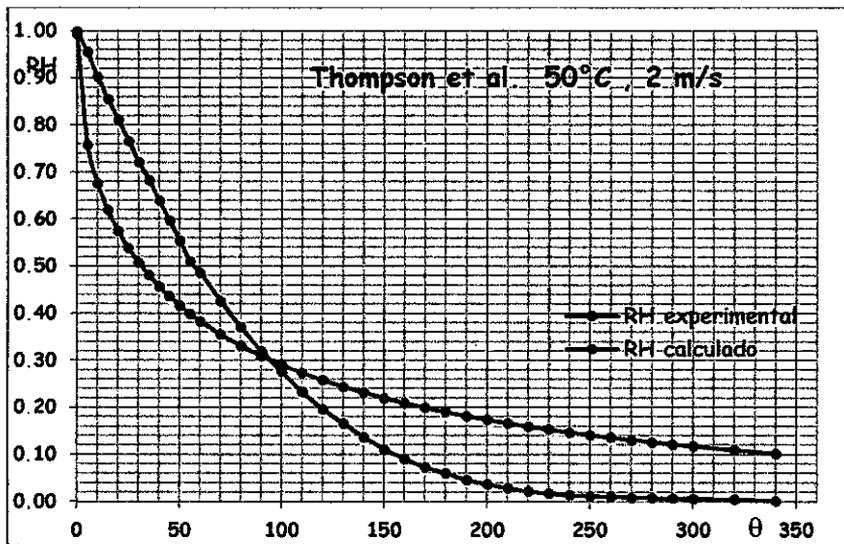
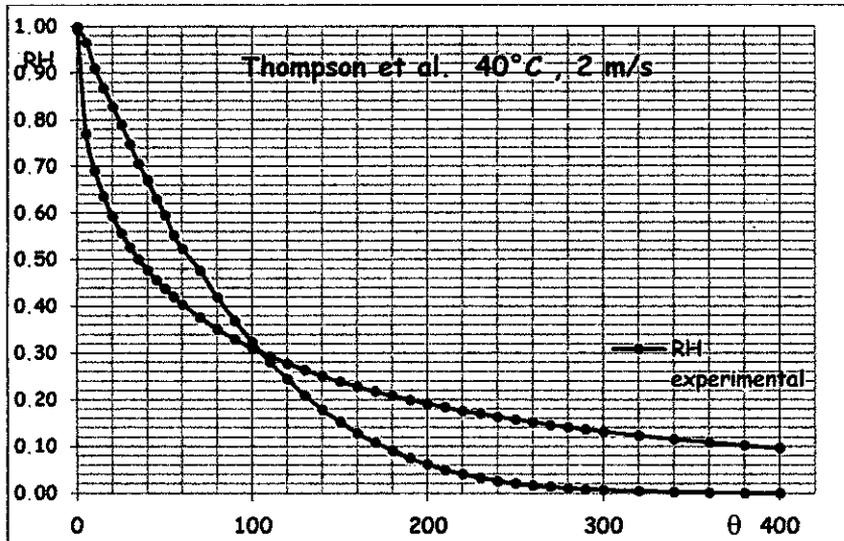
## MODELO EXPONENCIAL DE DOS TÉRMINOS



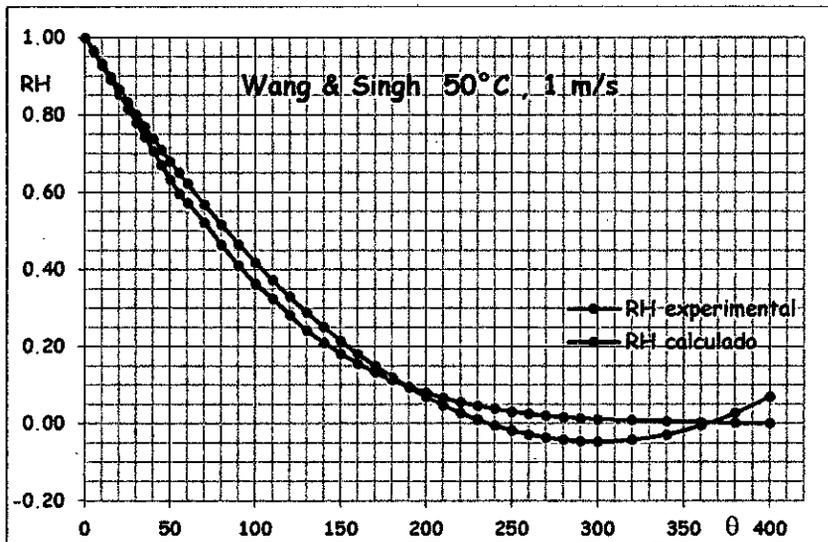
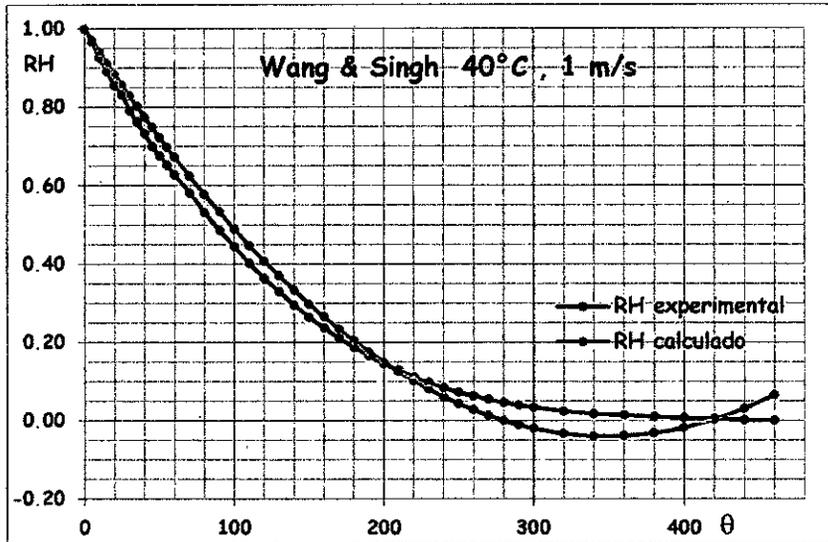


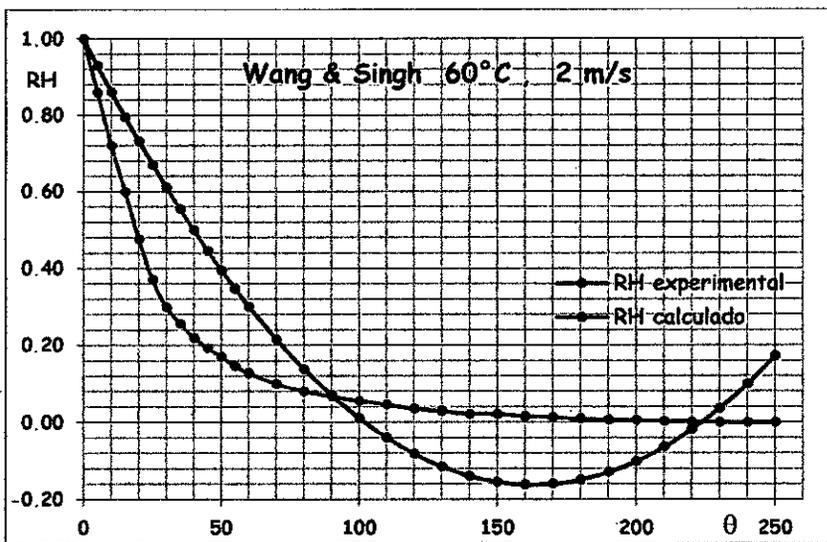
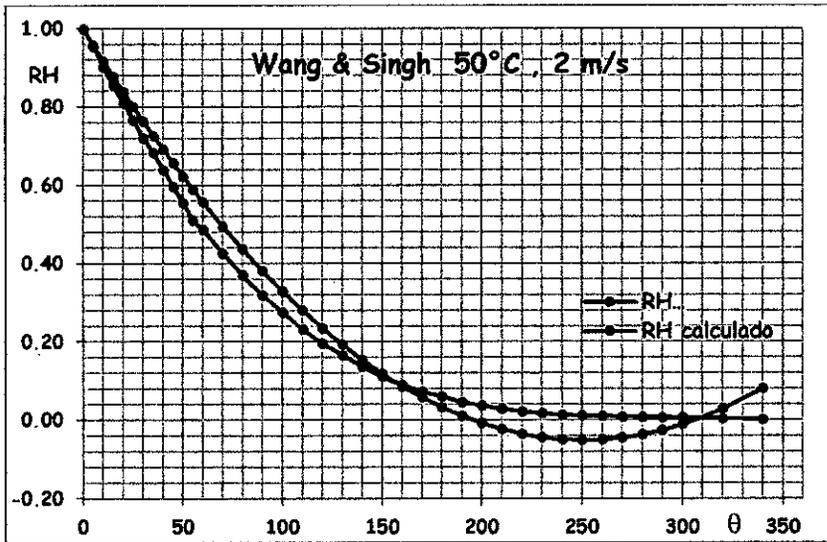
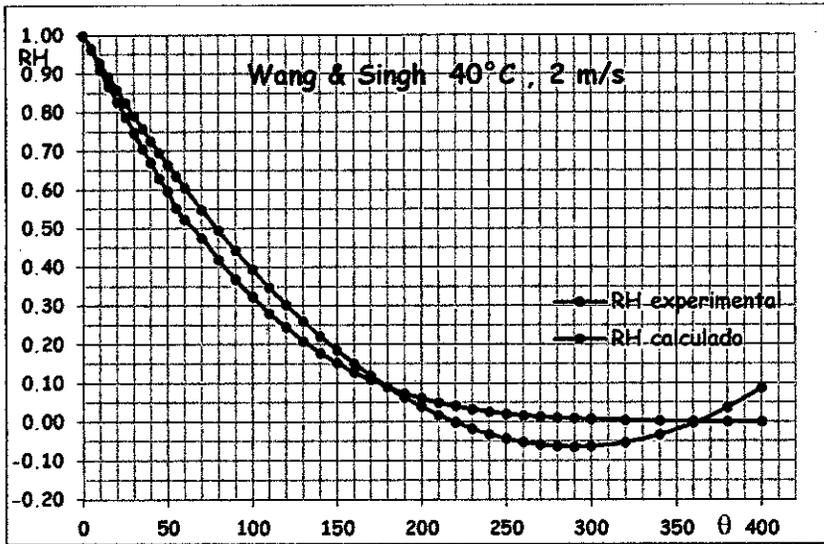
## MODELO DE TOMPSON et al.





## MODELO DE WANG & SINGH





## MODELO DE APROXIMACIÓN A DIFUSIÓN

